LIBRI DI BASE

ELETTRONICA

MOTORINI ELETTRICI

GRUPPO EDITORIALE JACKSON

LIBRI DI BASE

ELETTRONICA

MOTORINI ELETTRICI

INDICE

Capitolo 8

Capitolo 9

Capitolo 10

Capitolo 11

CAPITOLO 1

ELEMENTI DI MAGNETISMO

Si intende per *magnetismo*, la proprietà che hanno certi corpi, in particolare i composti del ferro, di esercitare una azione di *attrazione* o *repulsione* nei confronti di corpi analoghi.

Questa proprietà è relativa in particolare all'ossido di ferro (Fe_3O_4), definito anche *ferro magnetico*; questa sostanza costituisce una *calamita naturale*, mentre le *calamite artificiali* sono costituite da barre o aghi di acciaio temperato, che possiedono le stesse proprietà, ma solo dopo che hanno subito l'influenza di un altro corpo calamitato, o di un dispositivo che presenti le stesse caratteristiche magnetiche.

Il magnetismo si manifesta come attrazione o repulsione che un corpo calamitato (o magnetico) esercita su di un altro corpo simile; inoltre il corpo calamitato, con la forma di un ago, se viene appeso ad un filo verticale in modo che possa ruotare liberamente su di un piano orizzontale, assumerà una orientazione predeterminata e sempre uguale, con uno dei suoi estremi rivolto verso il polo Nord, e l'altro verso il polo Sud.

Questo fatto, che costituisce il principio di funzionamento della bussola, ha portato a definire i due estremi di una calamita come *poli magnetici*; in particolare, l'estremo orientato verso il polo Nord viene definito *polo magnetico nord*, mentre quello orientato verso il polo Sud come *polo magnetico sud.*

Un esame dell'azione di un corpo magnetico A su di un corpo suscettibile a diventare un magnete artificiale B, mostra che il corpo B diventa un magnete con i due poli magnetici come il corpo A; in particolare, si osserva che il polo nord del corpo A respinge il polo nord del corpo B e attrae il suo polo sud, mentre, viceversa, il polo sud di A attrae il polo nord di B e ne respinge il polo sud.

Da tutto ciò si può affermare che:

- *due poli dello stesso tipo di un corpo magnetico si respingono, mentre due poli di tipo opposto si attraggono.*

Questa esperienza, esplicita due fenomeni distinti:

- l'azione mutua di due magneti, che si traduce in un movimento degli stessi, e che può essere definita come *azione dinamica*;
- la creazione di un magnete artificiale (il corpo B) come conseguenza della vicinanza di un magnete (corpo A), per effetto dell'*induzione magnetica.*

Infine, si può provare che l'azione che il nuovo magnete B esercita sul corpo A, è la stessa che il corpo A esercita sul corpo B, in conseguenza del principio di azione e reazione, in virtù del quale un corpo che esercita una azione su di un altro corpo, subisce a sua volta una azione uguale, ma di verso opposto, che non è altro che la reazione del secondo corpo sul primo.

L'interesse che presenta lo studio e l'osservazione di questi fenomeni di azione e reazione delle calamite naturali e artificiali, risiede soprattutto, dal punto di vista pratico, nell'analogia con dei fenomeni in apparenza più complessi, definiti *elettromagnetici.*

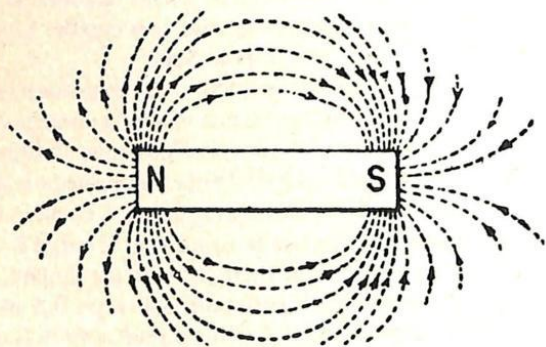



Fig. 1.- Limatura di ferro ripartita secondo linee regolari che vanno dal polo nord al polo sud, in un magnete.

Azione dinamica delle correnti

Se si considera un conduttore percorso da corrente elettrica, e si pone nelle sue vicinanze una calamita, si può osservare che si verificano gli stessi effetti che si verificavano precedentemente tra due calamite; si avrà cioè, una azione di attrazione o di repulsione.

Se, d'altra parte, si suppone il circuito percorso da una corrente che si muove attorno ad un asse, realizzato per esempio con un circuito chiuso salvo che nei punti di connessione con la sorgente di alimentazione, è possibile vedere che questi assume una orientazione determinata dall'azione di una calamita posta nelle sue vicinanze, come nel caso dell'ago magnetizzato attorno ad un asse verticale.

Se invece non esiste nessuna calamita in prossimità del circuito, questi si orienterà, come già accadeva anche per l'ago, in modo che i poli Nord e Sud del globo terrestre si trovino perpendicolari al piano del circuito.

Da questo, è possibile capire il perché si parla di analogia tra una calamita e il conduttore.

La realizzazione pratica del circuito mobile è il solenoide immaginato da Ampere, costituito da una bobina, ciascuna spira della quale può, con una sufficiente approssimazione, essere considerata come un circuito chiuso in cui il cavo di arrivo è separato dal cavo di partenza, e ambedue uniscono la spira considerata alla spira precedente e alla seguente rispettivamente.

Ciascuna spira può, in modo indipendente, essere assimilata al circuito appena descritto, e le azioni reciproche, tanto del solenoide sulla calamita che

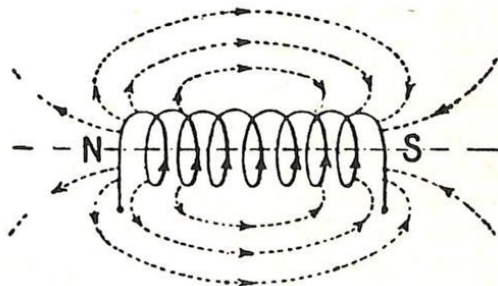



Fig. 2.- Limatura di ferro ripartita secondo linee regolari che vanno dal polo nord al polo sud, in un solenoide.

della calamita sul solenoide, sono la risultante delle azioni della calamita su ciascuna spira del solenoide e di ciascuna spira sulla calamita.

Infine, se si sostituisce la calamita con un altro solenoide, anch'esso percorso da corrente elettrica, si può verificare che avviene una azione reciproca tra i solenoidi, come nel caso precedente della calamita, il che porta alle conclusioni che:

- *un solenoide percorso da corrente elettrica di determinato valore, è in ogni punto assimilabile ad una calamita;*
- *l'asse del solenoide, perpendicolare al piano delle spire, è parallelo all'asse della calamita a cui si potrebbe paragonare;*
- *uno dei due estremi del solenoide, agisce allo stesso modo del polo nord della calamita, mentre l'altro agisce come il polo sud;*
- *la posizione dei poli del solenoide, dipende dal verso di circolazione della corrente nelle spire; il polo nord è alla sinistra di un osservatore che si trova nei pressi del conduttore, posto in modo che la corrente entri in corrispondenza dei suoi piedi, e che guardi verso il centro della spira.*

Campo magnetico

Vediamo ora, come si esplicano queste azioni meccaniche delle calamite e della corrente elettrica.

Se si pone nelle vicinanze di una calamita o di un solenoide percorso da corrente elettrica della limatura di ferro, si può notare che questa si dispone secondo linee regolari che vanno dal polo nord al polo sud; queste linee si dirigono parallelamente all'asse della calamita o del solenoide in prossimità dei poli, per poi curvarsi e riunirsi in prossimità dell'asse.

La quantità di limatura è molto maggiore nelle vicinanze dei poli, che ad una certa distanza, per cui ne risulta che l'azione della calamita o del solenoide è tanto più grande, quanto la distanza del punto considerato su cui viene esercitata questa azione è piccola.

Questa esperienza dimostra che l'introduzione di una calamita o di un solenoide percorso da corrente elettrica nelle vicinanze di limatura di ferro, porta ad una modifica nello stato fisico del mezzo, creando delle forze che si manifestano nello spostamento dei granuli di limatura in questo mezzo.

Questo ci porta a considerare i poli della calamita o del solenoide come centri di emanazione di forze magnetiche che si ripartiscono nel mezzo circostante, secondo linee definite *linee di forza*, di valore ben determinato, la cui distribuzione e direzione è esattamente rappresentata dalle linee secondo le quali si dispongono i granuli della limatura di ferro.

La rete di queste linee che solcano il mezzo, costituisce ciò che viene definito *campo magnetico*, che determina lo stato magnetico del mezzo.

L'intensità dell'azione esercitata dal centro di attrazione o repulsione, diminuisce quando ci si allontana da questo centro; le linee di forza saranno più dense in prossimità dei poli che ad una certa distanza.

Il valore di questa intensità, dipende dal fatto che si sia in presenza di una calamita naturale (se il centro di attrazione o repulsione è costituito da una calamita) o, nel caso di un solenoide, dall'intensità della corrente che lo percorre, dal numero delle spire che lo compongono, e dalla sua lunghezza.

In altro modo, si può dire che *il valore dell'intensità è legato alla natura stessa della causa che crea il campo magnetico.*

Per semplificare, si dice allora che questa causa, sia per una calamita che per un solenoide, ha una *massa magnetica*, che la definisce completamente dal punto di vista magnetico.

Una massa magnetica, da luogo ad un campo magnetico la cui intensità in un punto è data dal valore della forza di attrazione o repulsione che verrebbe esercitata su di una calamita o un solenoide posto nel punto considerato, e la cui massa sia uguale alla massa magnetica per unità.

Se si pone nel medesimo punto del campo magnetico una calamita la cui massa magnetica sia il doppio della precedente, l'intensità del campo dovuta alla massa magnetica non cambia, ma l'attrazione o la repulsione esercitata su questa nuova massa avrà un effetto due volte più grande che nel caso precedente.

Se si suppone l'esistenza di un campo magnetico dovuto ad una massa magnetica di valore noto, e se in questo campo, in un punto, in cui l'intensità sia determinata, definito H, si pone una calamita o un solenoide percorso da corrente, si può verificare che l'azione del campo magnetico sulla calamita o sul solenoide sarà tanto maggiore quanto maggiore sarà la superficie presentata alle linee di forza, poiché il numero di linee di forza che attraversano la superficie aumenta proporzionalmente alla stessa, *a condizione che le linee siano orientate nello stesso verso dell'asse del solenoide o della calamita.*

Il flusso di forze attraverso una superficie determinata, sarà esattamente pari al numero di linee di forza che attraversa la superficie considerata; poiché non è possibile valutare il numero di linee di forza (questa nozione è stata dedotta dall'esperienza fatta con la limatura di ferro, ed è stata utilizzata semplicemente per fornire una descrizione concreta del fenomeno), si è ricorso alla definizione di intensità del campo magnetico detta precedentemente e chiamata flusso di forze attraverso una superficie determinata S.

Il suo valore è definito dal prodotto del campo magnetico nel punto considerato, per la superficie S presentata al passaggio delle linee di forza; se Φ rappresenta il flusso di forze, e H l'intensità del campo magnetico, si avrà al-

lora:

$$\Phi = HS$$

Induzione

Un esame più approfondito dell'esperienza fatta con la limatura di ferro sottoposta all'azione di un campo magnetico, porta alle importanti conclusioni a cui si è arrivati, che diventano più evidenti se si sostituisce la limatura di ferro con una barretta di ferro dolce.

Il ferro dolce non può essere un magnete naturale, ma può diventare un magnete artificiale.

E' provato in effetti, che se questa barretta è sottoposta all'azione di un campo magnetico, subisce la stessa azione che subirebbe una calamita; questo fenomeno è spiegato, ammettendo che questa barretta si trasformi in un vero magnete, che cioè si *magnetizzi*, a causa dell'azione del campo magnetico. Inoltre, al cessare dell'azione del campo magnetico, il ferro dolce perde tutta la sua magnetizzazione; ciò dimostra che è totalmente incapace di creare a sua volta un nuovo campo magnetico.

Quando la barretta di ferro dolce è magnetizzata, vale a dire quando subisce l'influenza di un campo magnetico, la sua presenza modifica il campo magnetico esistente.

Se si rappresenta il campo magnetico con delle linee di forza, la direzione e la disposizione di quelle che fuoriescono dalla calamita che crea il campo magnetico esistente saranno differenti a causa dell'introduzione della barretta di ferro dolce.

Queste infatti, vengono attratte verso la barretta, e aumenta il loro numero e la densità nel punto di incontro con questo nuovo corpo; per spiegare questo fenomeno di cambiamento della direzione delle linee di forza, si considera la barretta di ferro dolce come una nuova calamita. Si dice in questo caso, che il campo magnetico *induce* o magnetizza la barretta di ferro dolce, da cui il nome di *induzione magnetica* a questo fenomeno.

Occorre però ricordare, che la barretta di ferro dolce perde le sue proprietà magnetiche nel momento in cui cessa l'azione del campo magnetico induttore.

Se al posto della barretta di ferro dolce si utilizza una barretta di acciaio temperato che non sia magnetizzata, anche questa si magnetizza allo stesso modo, sotto l'influenza di un campo magnetico; se però, dopo un certo tempo, viene soppressa l'azione del campo magnetico induttore, è possibile verificare che la barretta rimane magnetizzata, e perde solo parzialmente le sue proprietà magnetiche.

Questo fenomeno di smagnetizzazione incompleta viene definito *istere-*

si, e il suo effetto varia con la purezza del metallo.

Il comportamento differente tra la barretta di ferro dolce e quella di acciaio temperato, è dovuto alla coesione molecolare del metallo; nel ferro dolce le molecole sono molto libere tra di loro, per cui sono molto sensibili alle sollecitazioni esterne, come quella dovuta ad un campo magnetico, con una magnetizzazione rapida; nel momento in cui l'azione del campo magnetico esterno viene a cessare, le molecole recuperano facilmente la loro posizione originale, che si traduce in una rapida smagnetizzazione.

Non avviene la stessa cosa nell'acciaio temperato, in cui le molecole, intimamente legate tra di loro, subiscono molto poco e con molta difficoltà qualunque sollecitazione che tenda a modificarne la posizione relativa, come l'azione del campo magnetico esterno, per cui la magnetizzazione avviene in modo molto lento; però, dopo aver raggiunto un nuovo stato, queste molecole hanno la tendenza a mantenerlo, per cui il corpo rimane magnetizzato anche quando cessa l'azione del campo magnetico.

In entrambi i casi si tratta di un fenomeno di induzione magnetica, il cui effetto è identico come principio, ma diverso nel dettaglio e variabile con la purezza del metallo in gioco. Nel punto in cui è posta la barretta metallica considerata, si ha un aumento apparente dell'intensità del campo magnetico; in realtà, la presenza della barretta metallica causa l'esistenza di un nuovo aumento del campo magnetico, detto *induzione magnetica.*

Il coefficiente di induzione magnetica per intensità media del campo nello stesso punto, prima dell'introduzione della barretta metallica, costituisce il *coefficiente di permeabilità magnetica.*

Infine, se al posto di un corpo magnetico non magnetizzato si introduce nel campo magnetico un solenoide non percorso da corrente, l'esperienza insegna che questi si comporta come una barretta di ferro dolce o di acciaio non magnetizzata, allo stesso modo in cui precedentemente si è dimostrato che il solenoide percorso da corrente si comportava come una calamita.

E' interessante segnalare questa analogia, che si può dire completa, e che permetterà di fornire una descrizione molto semplice di fenomeni in apparenza molto complessi.

Data l'importanza di questi fenomeni, e l'interesse immediato che presentano dal punto di vista dell'applicazione pratica, è necessario fare alcune precisazioni per poterli comprendere meglio.

Supponiamo di essere in presenza di un campo magnetico nel quale viene posto un solenoide, che per semplificare la descrizione supponiamo composto da una sola spira, poiché risulterà poi molto facile riportare i risultati acquisiti ad un solenoide di n spire. Supponiamo inoltre che i due estremi della spira siano sufficientemente vicini da poter considerare la spira chiusa; questi estremi in effetti, sono chiusi tramite un apparecchio di misura che permetta

la rilevazione della presenza di una corrente elettrica (amperometro o voltmetro).

Se la spira rimane immobile all'interno del campo magnetico, non si ha nessuna variazione dello stato esistente, vale a dire che la spira che rimane immobile non è percorsa da nessuna corrente, e che le linee di forza seguono il normale percorso. Non esiste infatti nessuna ragione per cui il fatto che una porzione di spazio che circonda un corpo conduttore (dal punto di vista elettrico) insensibile di per se stesso all'azione del campo magnetico, subisca una perturbazione.

Se però si dispone la spira perpendicolarmente alla direzione delle linee di forza, si rompe l'equilibrio, nel senso che certe linee di forza che avrebbero dovuto attraversare la superficie abbracciata dal conduttore, in realtà non la attraversano e viene invece attraversata da nuove linee di forza. Detto in altro modo, se Φ_1 è il flusso delle forze che attraversa la superficie della spira prima del suo spostamento, e Φ_2 il flusso dopo lo spostamento, la variazione del flusso vale $\Phi_2 - \Phi_1$ ed è proporzionale al valore dello spostamento.

Inoltre, si può rilevare, durante questo spostamento della spira, una deviazione dell'ago dello strumento di misura posto ai capi della stessa, che definisce la presenza di una corrente.

La creazione di questa corrente è dovuta, come la magnetizzazione della barretta di ferro, all'effetto dell'induzione magnetica, per cui viene definita *corrente indotta*.

Forza elettromotrice

Per meglio comprendere la causa dei fenomeni di induzione magnetica, è opportuno considerare l'esistenza di un campo magnetico in un mezzo i cui elementi sono in stato di equilibrio.

Se si introduce nel campo un corpo magnetizzabile, tuttavia non magnetizzato, si rompe l'equilibrio, poiché le linee di forza del campo magnetico incontrano un percorso meno resistente attraverso questo nuovo corpo, rispetto all'aria; si ha perciò una concentrazione delle linee nel corpo, le cui molecole hanno la tendenza ad opporsi all'azione del campo magnetico, con conseguente magnetizzazione dello stesso che implica una variazione del mezzo.

Nel caso di una spira non percorsa da corrente, quando il mezzo è in equilibrio, in cui avviene tutta la variazione del flusso delle forze, vale a dire la rottura dell'equilibrio, viene indotta una corrente mentre perdura questa variazione; anche in questo caso si ha la creazione di un campo magnetico che si oppone alla rottura dell'equilibrio.

Così, una spira non può essere al centro di un campo magnetico se non è percorsa da una corrente elettrica; se si sposta all'interno di un campo magne-

tico, in modo da variare il flusso di forze che la attraversano, si trasforma, durante questo periodo e finché non si raggiunge l'equilibrio, in un generatore di corrente elettrica, comparabile ad una pila: questa corrente è precisamente la corrente indotta definita precedentemente.

Viene creata dalla necessità di dare origine a sua volta, ad un campo magnetico che deve impedire la variazione del flusso di forze.

E' facile intuire che la corrente così indotta, che sarà definita dalla forza elettromotrice esistente ai capi della spira, è tanto più significativa, quanto più grande è la variazione del flusso di forze, e quanto più corta è la durata di questa variazione.

Questa *forza elettromotrice* è proporzionale alla variazione del flusso di forze, che passa dal valore Φ_1 al valore Φ_2, e inversamente proporzionale alla durata t di questa variazione; queste correlazioni si possono esprimere con l'equazione:

$$E = k \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$$

nella quale k rappresenta un coefficiente di proporzionalità che dipende dal sistema di misura adottato.

Se al posto di una spira si considera un solenoide di n spire avvolte in serie, la forza elettromotrice indotta in ogni spira è data dalla relazione suddetta, considerando i flussi di forze Φ_1 e Φ_2 come valori iniziale e finale rispettivamente, identici per ogni spira, la forza elettromotrice indotta nel solenoide è la somma delle n forze elettromotrici:

$$nE = kn \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$$

Da quanto detto, risulta che il verso della corrente nella spira deve essere tale che il campo magnetico al quale da origine si opponga alla variazione del flusso di forze che attraversa la superficie; vale a dire che il campo magnetico dovuto alla corrente indotta, ha lo stesso verso del campo che si avrebbe se il flusso diminuisse, cioè se Φ_2 risulta inferiore a Φ_1, mentre è di verso contrario al precedente, se il flusso ha la tendenza ad aumentare, sempre con l'obiettivo di opporsi alla sua variazione.

Per semplificare lo studio dei versi della corrente nella spira o nel solenoide, basta ricordarsi della regola del cavatappi, che è la seguente:

- *il verso positivo della forza elettromotrice in una spira è quello di*

avvitamento di un cavatappi che debba essere inserito nella spira stessa nel verso delle linee di forza. Se in queste condizioni, la variazione del flusso delle forze che attraversa la spira è tale che il flusso diminuisce, la forza elettromotrice indotta è diretta nel verso positivo definito precedentemente; se, al contrario, il flusso tende ad aumentare, la forza elettromotrice è diretta in senso negativo.

CAPITOLO 2

CREAZIONE DEL CAMPO MAGNETICO

I fenomeni trattati nel capitolo precedente, sia le azioni meccaniche reciproche delle calamite e della corrente, che i fenomeni di induzione, sono legati all'esistenza di un campo magnetico. E' importante perciò, per provocare questi fenomeni e trarne vantaggio, creare un campo magnetico che deve essere tanto più intenso, quanto più significativi devono essere i fenomeni che in esso si riproducono.

Come realizzare un campo magnetico di elevata intensità?

Nel caso di una calamita, l'intensità del campo dipende dalla purezza del metallo che la costituisce, e dal grado di magnetizzazione proprio della sostanza stessa.

Nel caso di un solenoide percorso da corrente elettrica, il campo magnetico a cui da origine è proporzionale all'intensità della corrente stessa; è sufficiente aumentare il valore di questa intensità, per aumentare conseguentemente il valore del campo prodotto.

Esiste però un problema, nel caso del solenoide, dovuto alla dispersione delle linee di forza che partono dal solenoide stesso, che rimangono orientate in modo peggiore rispetto alla calamita, per cui risulta una riduzione dell'intensità del campo magnetico in prossimità del solenoide.

Per minimizzare questo inconveniente, viene introdotta all'interno del solenoide una barretta di ferro dolce che, come già visto, offre meno resistenza dell'aria al passaggio delle linee di forza, le quali si concentrano, per la maggior parte, in questa; all'uscita della barretta di ferro dolce, trasformata in calamita dall'azione del campo magnetico creato dal solenoide, le linee di forza rimangono orientate come nel caso della calamita naturale, e mantengono la stessa direzione.

Questa combinazione (solenoide e barretta di ferro) costituisce un *elettromagnete*, che presenta, rispetto alla calamita, il vantaggio di creare un campo magnetico la cui intensità è praticamente regolabile tramite la variazione dell'intensità della corrente che percorre il solenoide; grazie alla sua rapida magnetizzazione e smagnetizzazione, il ferro dolce è sensibile alle variazioni dell'intensità della corrente, fino ad un valore limite determinato, che caratterizza lo stato di *saturazione magnetica* del metallo.

In mancanza di corrente il campo magnetico è nullo, e praticamente vale zero; in effetti, non si annulla completamente, a causa del ferro utilizzato per la costruzione della macchina elettrica. Il campo magnetico che rimane dopo la smagnetizzazione, viene definito *magnetismo residuo*, e verrà trattato di seguito in questo volume.

Pertanto un elettromagnete, da un lato permette la regolazione dell'intensità del campo magnetico, dall'altro garantisce la concentrazione delle linee di forza nel punto prestabilito, in cui il campo magnetico deve produrre l'effetto che si desidera ottenere; vale a dire che questo dispositivo permette di ottenere una migliore utilizzazione del campo magnetico prodotto dalla corrente.

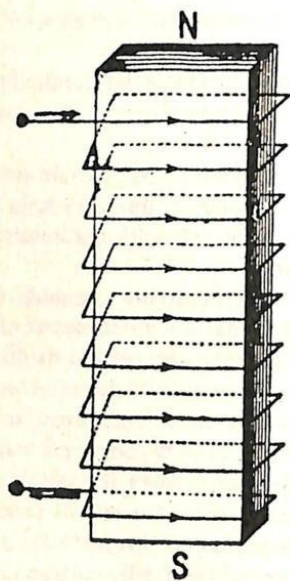



Fig. 1.- Dispositivo di base che forma un elettromagnete.

In Fig. 1 è rappresentato un dispositivo come quello descritto.

E' necessario che le spire siano avvolte sempre nello stesso senso, in modo che il campo magnetico prodotto da ciascuna spira abbia lo stesso verso, e si sommi a quelli prodotti dalle altre.

La concentrazione delle linee di forza rispetto all'asse del nucleo, si traduce nella sostituzione dell'induzione al campo magnetico in questo punto, che corrisponde ad un aumento del campo magnetico stesso, definito dal *coefficiente di permeabilità* del metallo che costituisce il nucleo.

All'uscita del polo nord dell'elettromagnete, le linee di forza si curvano, su entrambi i lati dell'asse, per dirigersi verso il polo sud, disperdendosi però nell'aria.

In effetti, è possibile orientarle, vale a dire imporre un percorso predeterminato, unendo i poli nord e sud mediante un corpo magnetico che tenderà, a causa delle proprietà dei corpi magnetici, a concentrare tutte queste linee di forza nel mezzo che le circonda; questa concentrazione magnetica stabilita tra i due poli dell'elettromagnete, esternamente al solenoide, forma con la barretta di ferro dolce, interna al solenoide, un circuito magnetico chiuso.

La barretta di ferro dolce costituisce il *nucleo* dell'elettromagnete, mentre la connessione esterna di fusione o di ferro, costituisce un cortocircuito magnetico.

Questo circuito è la sede di un campo magnetico definito dall'intensità della corrente che circola nelle spire del solenoide, e dal coefficiente di permeabilità dei metalli che costituiscono le diverse parti del circuito.

Il solenoide o la bobina che crea il campo magnetico, costituisce *l'avvolgimento induttore* del sistema (Fig. 2).

Se si considera, al posto di un solo solenoide con il suo nucleo, un sistema formato da due solenoidi i cui assi siano perpendicolari, circondanti ciascuno un nucleo, e con un telaio che circondi il tutto, si realizza un induttore a quattro poli, due nord e due sud, ripartiti come indicato in Figg. 3 e 4.

Si comprende facilmente come sia possibile creare induttori con un numero di poli qualsiasi, a condizione che questo numero sia pari, poiché ad un polo deve sempre corrispondere un altro polo di nome opposto. Il primo sistema considerato viene definito *induttore bipolare*, mentre quelli a più poli vengono definiti *induttori multipolari*.

Lo scopo di un sistema bipolare o multipolare è quello di creare un campo magnetico intenso, che permetta di ottenere la trasformazione dell'energia meccanica disponibile in energia elettrica, o la trasformazione inversa, grazie ai fenomeni di induzione ed elettrodinamici provocati dal campo magnetico.

Il campo magnetico costituisce in un certo modo il mezzo, il fattore per il quale avviene questa trasformazione, grazie alla adeguata combinazione naturale dei fenomeni elettrici e magnetici.

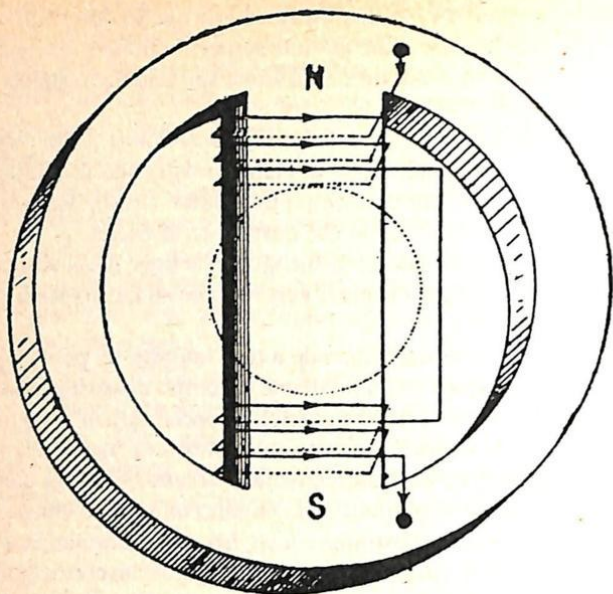



Fig. 2.- Circuito magnetico chiuso.

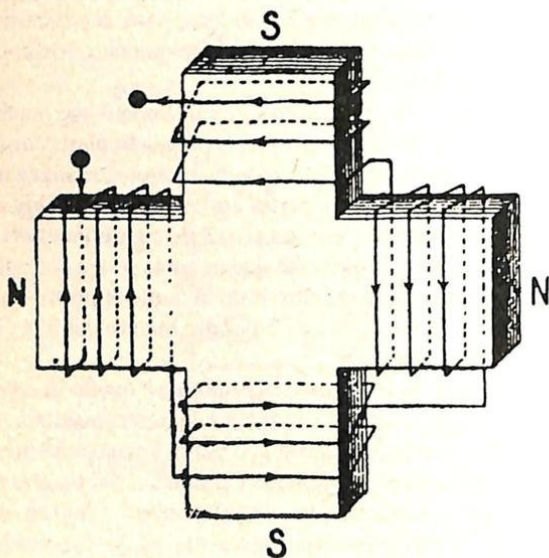



Fig. 3.- Sistema formato da due solenoidi i cui assi sono perpendicolari.

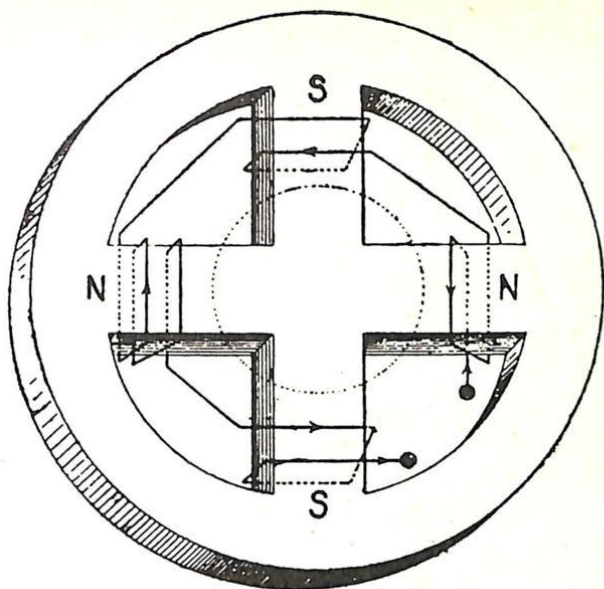



Fig. 4.- Sistema precedente in un circuito magnetico chiuso.

E' importante ottimizzare i vantaggi offerti dal campo magnetico così prodotto, in modo da poter raggiungere il punto in cui questo campo assume il suo valore massimo di intensità; questo punto dipende dal o dai nuclei del o dei solenoidi, ed è posto al centro di questi.

Se poi, relativamente al sistema induttore bipolare, si suppone il nucleo sezionato, come indicato in Fig. 5, ciascuno dei due estremi del nucleo, che non si toccano, si converte in un elettromagnete portante uno dei due poli, senza che vi siano alterazioni nella direzione e nella distribuzione delle linee di forza.

Lo stesso sezionamento può essere applicato anche ad un sistema induttore con più di due poli; in Fig. 6 è rappresentato un sistema a quattro poli modificato in questo modo.

Al centro di questo sistema, nella parte di spazio rimasta vuota, passano le linee di forza che si dirigono da un polo a quello immediatamente più vicino, ed è il campo magnetico in questa zona che verrà sfruttato per le prossime applicazioni.

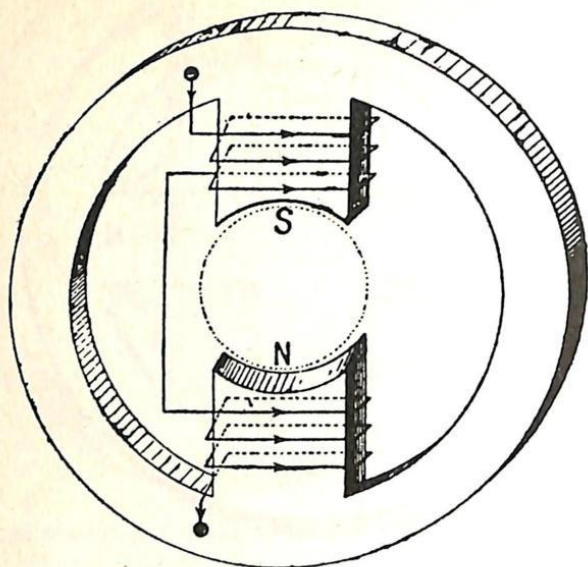



Fig. 5.- Nucleo sezionato di un sistema induttore bipolare.

Applicazioni dei fenomeni di induzione

Se si suppone che in questa porzione di spazio vuoto compresa fra i nuclei venga posto un cilindro che possa ruotare sul proprio asse, passante per il centro del sistema perpendicolarmente al piano della figura (Figg. 5 e 6), e avvolgendo diametralmente attorno alla sua superficie due conduttori che formino un circuito chiuso, simile ad una spira, questo circuito abbraccia una superficie piana determinata, che per semplicità viene definita S.

Facendo ruotare il cilindro, e di conseguenza la spira, il flusso che attraversa la superficie S varia con la superficie offerta al passaggio delle linee di forza.

Quando, in effetti, il piano della superficie S è perpendicolare alla direzione delle linee di forza, vale a dire alla linea che ipoteticamente unisce due poli consecutivi definita *linea dei poli*, la superficie S presentata alle linee è tutta la superficie che abbracciano i conduttori considerati; questa superficie diminuisce e diventa nulla, quando il suo piano è parallelo alla direzione delle linee di forza. E' evidente che in questa posizione dei conduttori, la super-

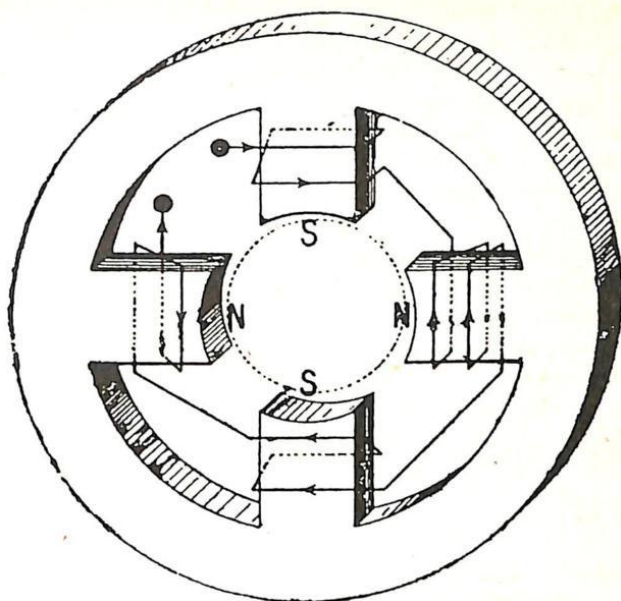



Fig. 6.- Nucleo sezionato di un sistema induttore quadripolare.

ficie S non viene attraversata da nessuna linea di forza.

Il valore del flusso nel primo caso, se H rappresenta l'intensità del campo magnetico, vale:

$$\Phi = HS$$

mentre nel secondo caso vale:

$$\Phi = H \times 0 = 0.$$

Il flusso è variato da un valore Φ ad un valore 0, e questa variazione da origine, per induzione, ad una *forza elettromotrice* con direzione e valore determinati. Quando la superficie offerta alle linee di forza aumenta, attraversata però in senso opposto rispetto al precedente, la forza elettromotrice, che assume gli stessi valori precedenti, se il flusso è lo stesso di prima, cambia di direzione.

La Fig. 7 rappresenta schematicamente le variazioni della forza elettro-

motrice in una spira durante la rotazione di un giro completo, in un campo magnetico creato da un induttore bipolare.

Nella figura di sinistra sono indicate le diverse posizioni successive *A,2,3* della spira considerata, mentre a destra sono riportati i valori della forza elettromotrice in questa spira relativi a ciascuna posizione. In *A* e *B* la forza elettromotrice è nulla; raggiunge il valore massimo (M) in 4, ed assume lo stesso valore, ma in verso opposto, in 10 (N).

Quello descritto, è il principio di funzionamento delle macchine elettriche, destinate a trasformare energia meccanica in energia elettrica, denominate *generatori*.

L'energia meccanica a disposizione, viene utilizzata per produrre lo spostamento della parte mobile che costituisce l'*indotto* della macchina, mentre l'energia elettrica viene ricavata agli estremi del circuito formato dai conduttori dell'avvolgimento di indotto.

Se, al posto dei due conduttori uniti tra di loro, si suppone di utilizzare un cilindro avvolto da *2n* conduttori uniti due a due, e ripartiti uniformemente sulla superficie laterale del cilindro mobile in un campo magnetico, si possono fare le stesse considerazioni fatte precedentemente, per ogni sistema formato da due conduttori.

Dall'esame del fenomeno risulta che:

- se si considera il valore della forza elettromotrice indotta in ciascun sistema di conduttori nel momento del suo passaggio in un punto fisso dello spazio, risulta che è sempre lo stesso in questo punto (supponendo il movimento di rotazione uniforme,

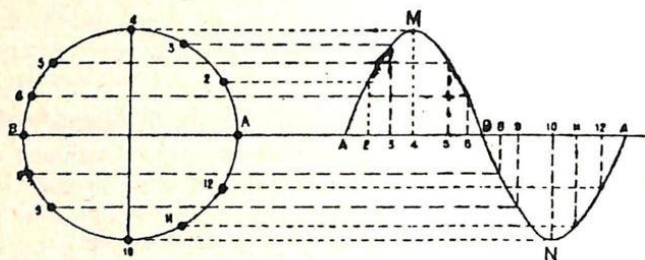



Fig. 7.- Variazioni della forza elettromotrice in una spira, durante una rotazione completa in un campo magnetico creato da induttori bipolari.

vale a dire una velocità costante di spostamento dei conduttori nel campo magnetico);

- se tutti i sistemi di conduttori uniti tra di loro a due a due vengono collegati in serie, le forze elettromotrici indotte in ciascun sistema si sommano o sottraggono tra di loro, in funzione del verso di circolazione della corrente in ciascuna spira, e la forza elettromotrice totale risulterà perciò nulla;
- se invece di considerare l'avvolgimento indotto nel suo complesso, lo si suppone separato in due parti rigorosamente uguali, poste in due punti diametralmente opposti A e B fissi nello spazio, la forza elettromotrice media tra questi due punti non varia.

Corrente continua

La corrente generata nei due punti fissi A e B citati nel paragrafo precedente, è una corrente continua identica a quella generata da una pila. Il dispositivo che permette di ricavare la corrente in queste condizioni, che permette cioè di realizzare la separazione dell'avvolgimento indotto rispetto a due punti fissi e con l'avvolgimento stesso in movimento, è definito *collettore*.

Il collettore è costituito da lamelle conduttrici isolate tra di loro, e colle-

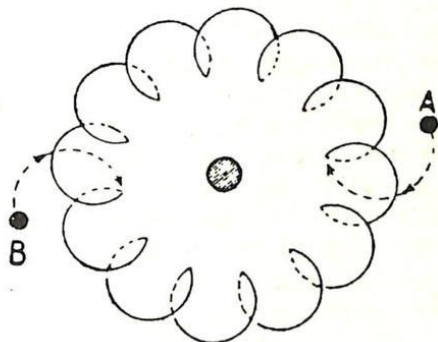



Fig. 8.- Avvolgimento dell'indotto considerato, separato in due parti rigorosamente identiche.

gate ciascuna ad un sistema di due conduttori uniti tra di loro; mediante queste lamelle, anche i sistemi di conduttori vengono uniti tra di loro.

Nei due punti in cui viene ricavata la corrente, ci sono due *spazzole*, ciascuna delle quali tocca da un lato il collettore, mentre è collegata dall'altro con i morsetti di uscita, da cui partono i fili o cavi di alimentazione per il circuito esterno.

Il caso considerato era relativo ad un avvolgimento induttore bipolare. I ragionamenti fatti, e le conclusioni a cui si è arrivati, non differiscono minimamente per le macchine con avvolgimenti multipolari, per cui è ovvio esaminare questi fenomeni, il cui principio è identico per ogni tipo di macchina.

Nella descrizione di questi principi, la complessità e la difficoltà sono dovute alla disposizione adottata per suddividere i conduttori sul cilindro mobile, e per collegarli tra di loro in funzione dei risultati che si vogliono ottenere.

E' importante inoltre, definire la posizione che devono avere le spazzole, e dimostrarne l'importanza. Se si considerano come punti fissi per il ricavo della corrente indotta i punti diametralmente opposti in cui la forza elettromotrice cambia verso, risulta che le forze elettromotrici di ciascun conduttore, o di ciascun sistema di conduttori, si sommano in ciascuno dei due gruppi così formati.

La forza elettromotrice ricavata, è dunque la somma delle forze elettromotrici di ciascuna spira; in questi punti si avrà il valore massimo.

Se, in effetti, fossero stati presi altri due punti, ugualmente diametralmente opposti, si sarebbe constatato che in ciascuno dei due gruppi si sarebbero avuti uno o più sistemi di conduttori, nei quali la forza elettromotrice assume un verso opposto a quello assunto dagli altri conduttori dello stesso gruppo; verrebbe perciò sottratta da quella degli altri conduttori, e la forza elettromotrice ricavata sarebbe inferiore a quella ottenuta nel caso precedente.

La posizione più vantaggiosa è perciò quella considerata nel primo caso; è importante però, segnalare che un avvolgimento indotto può essere considerato come un solenoide percorso da corrente che genera, a sua volta, un campo magnetico con le proprie linee di forza di determinata direzione. Per questo motivo, i punti in cui la forza elettromotrice cambia verso, risultano spostati rispetto a quelli che si avrebbero se non esistesse il campo magnetico dovuto alla corrente indotta. Questo aspetto viene illustrato in Fig. 9.

Riassumendo, l'avvolgimento induttore, percorso da corrente elettrica, genera un campo magnetico a causa del fenomeno di induzione magnetica sul suo nucleo. Questo campo si concentra nel sistema formato da:

- due nuclei opposti, o due estremi di un nucleo che si suppone sezionato, come detto precedentemente;
- una calotta che chiude il circuito magnetico;

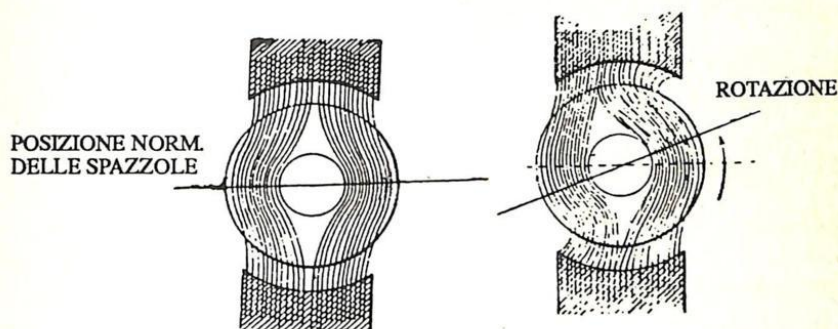



Fig. 9.- Posizione delle spazzole.

- un cilindro su cui sono avvolti i conduttori che costituiscono l'avvolgimento indotto.

Questo cilindro è formato da lamelle di acciaio, per poter ottenere la massima utilizzazione possibile del campo magnetico, e per evitare una dispersione delle linee di forza nel mezzo compreso tra la calotta e i poli. Le lamelle di acciaio, essendo magnetiche, concentrano le linee di forza nel punto in cui devono essere utilizzate, vale a dire che le obbligano a passare attraverso la superficie ruotante dell'avvolgimento indotto.

Viene normalmente utilizzato un acciaio il cui coefficiente di permeabilità è molto elevato, in modo che presenti una resistenza molto bassa al passaggio di queste linee di forza, e in modo che il campo magnetico, e di conseguenza il flusso attraverso le spire dell'avvolgimento indotto, possa raggiungere valori molto elevati.

Inoltre, queste lamelle sono isolate elettricamente tra di loro, per evitare una circolazione di corrente indotta che provocherebbe una perdita di energia, opponendosi alla rotazione del cilindro; questa perdita è paragonabile ad una perdita per frizionamento.

Corrente alternata

Ritornando al caso di un avvolgimento induttore bipolare e di un sistema formato da 2n conduttori avvolti su di un cilindro ruotante in un campo

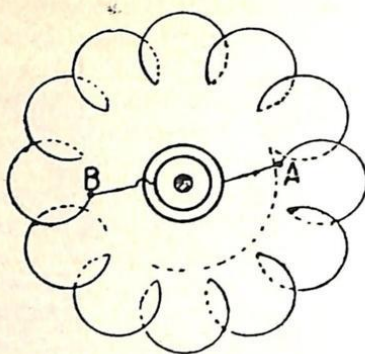



Fig. 10.- Per ricavare la corrente alternata, si deriva da due punti diametralmente opposti sull'avvolgimento di indotto.

magnetico, si può ricavare la corrente indotta nei conduttori, a differenza del caso precedente in cui veniva ricavata in due punti fissi diametralmente opposti, in due punti diametralmente opposti dell'avvolgimento indotto A e B, come mostrato in Fig. 10, che separano i conduttori in due gruppi, uniti tra di loro ad un estremo, e collegati a due anelli separati all'altro estremo, che ruotano con il cilindro; la forza elettromotrice media tra questi due anelli varia in modo continuo.

Infatti, si può notare che la forza elettromotrice assume dei valori che vanno da zero ad un valore massimo, per poi discendere, ritornare a zero e cambiare verso; ciò è dovuto al fatto che ognuno dei due gruppi di conduttori collegati ai rispettivi anelli, comprende dei conduttori in cui la forza elettromotrice cambia di valore e di verso in ogni istante.

Nel momento in cui la forza elettromotrice assume lo stesso verso in tutti i conduttori dello stesso gruppo, raggiungerà anche il suo valore massimo; immediatamente dopo comincerà a diminuire, poiché cambia verso in alcuni conduttori, proporzionalmente alla variazione della sua posizione all'interno del campo magnetico. Quando nella metà dei conduttori dello stesso gruppo la forza elettromotrice assume un determinato verso, e nell'altra metà il verso opposto, si avrà una risultante nulla, e il valore della forza elettromotrice sarà zero. Il processo si ripete poi con continuità.

L'insieme dei valori successivi che la forza elettromotrice assume, tenendo conto del suo verso, costituisce un *ciclo* o un *periodo* corrispondente al-

la velocità di rotazione del cilindro. La corrente così prodotta, è una corrente variabile in ogni istante e in modo regolare, detta *corrente alternata.*

Viene definita tramite il numero di periodi per secondo, per cui, una corrente di 50 periodi per secondo, corrisponde al passaggio di 50 volte per secondo della forza elettromotrice per il suo valore massimo, in un verso e nell'altro, attraverso tutti i valori intermedi relativi.

Come nel caso dei generatori di corrente continua, è possibile, al posto di due poli induttori, utilizzare varie paia di poli; i due punti dell'avvolgimento indotto che sono collegati ai rispettivi anelli collettori, non sono opposti dal punto di vista geometrico, ma dal punto di vista elettrico o magnetico: vengono scelti due punti in modo che, ad esempio, quando uno corrisponde all'asse del polo nord, l'altro corrisponda all'asse del polo sud immediatamente successivo (Fig. 11).

Poiché tra questi due poli sono intercalati uno o più paia di poli, è facilmente comprensibile, confrontando questo esempio con quello relativo alla macchina bipolare e facendo riferimento alla Fig. 11, che la forza elettromotrice subisce la serie completa di variazioni descritte precedentemente, quan-

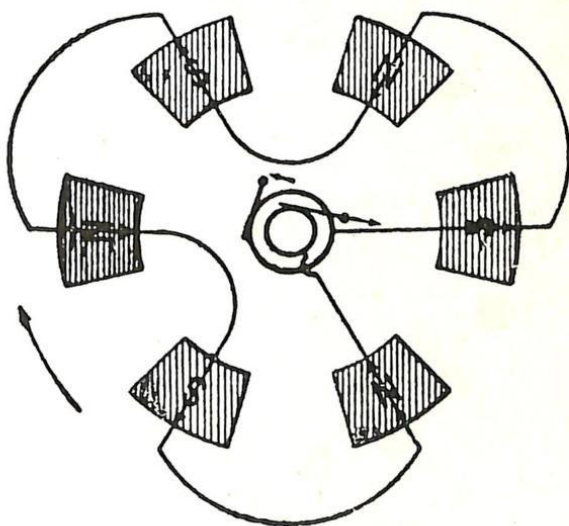



Fig. 11.- Generatore di corrente alternata multipolare.

do lo stesso punto dell'avvolgimento passa da un polo a quello immediatamente successivo dello stesso nome. Come risultato, si ha che in una rotazione completa la forza elettromotrice indotta passa p volte per gli stessi valori, sia in un verso che nell'altro; in altre parole, si possono considerare p periodi, se p rappresenta il numero di paia di poli.

Se n è il numero di giri al minuto, il numero di periodi sarà di pn al minuto, e $pn/60$ al secondo.

Il ragionamento è assolutamente lo stesso, se si suppone l'avvolgimento indotto fisso e i poli induttori mobili: è sufficiente infatti, provocare lo spostamento di un organo rispetto all'altro.

In questo caso, che è quello più frequentemente applicato nella costruzione degli *alternatori* (generatori di corrente alternata), la corrente indotta si ricava su due morsetti fissi, mentre la corrente, chiamata di *eccitazione*, che produce il campo induttore, è portata all'avvolgimento induttore per mezzo di due spazzole fisse, a contatto con due anelli che sono a loro volta collegati all'avvolgimento.

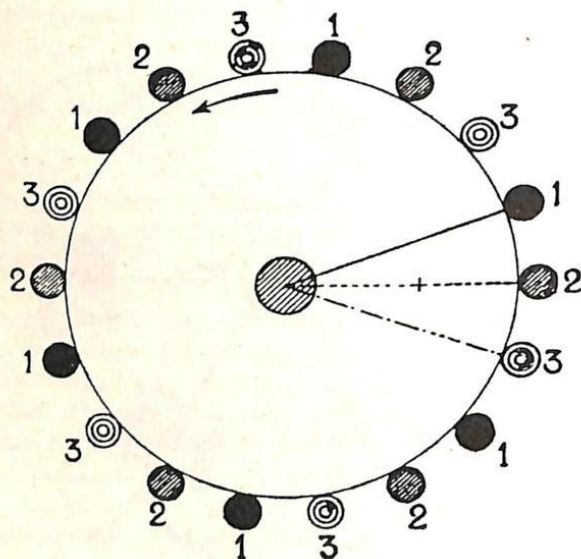



Fig. 12.- Punti in cui viene ricavata la corrente in ogni avvolgimento, scalati gli uni rispetto agli altri.

Infine, se si sovrappone a questo primo avvolgimento indotto uno o più avvolgimenti, identici al primo, indipendenti tra di loro dal punto di vista elettrico, ciascuno di questi si trasforma in un generatore di una forza elettromotrice indotta le cui variazioni presentano le stesse caratteristiche della forza elettromotrice indotta nel primo avvolgimento.

Se i punti da cui si ricava la corrente in ciascuno di questi avvolgimenti sono scalati gli uni rispetto agli altri, vale a dire che si incontrano sulla circonferenza del sistema (Fig. 12) in modo tale che l'angolo tra di loro valga α e sia costante, la forza elettromotrice indotta del primo avvolgimento è diversa, in un dato istante, da quella del secondo avvolgimento.

Se lo spostamento relativo dell'induttore e dell'indotto avviene nel verso indicato in Fig. 12, la forza elettromotrice indotta nell'avvolgimento 1 risulterà anticipata rispetto a quella dell'avvolgimento 2, e così anche successivamente.

La corrente generata in questo modo è una corrente alternata con varie fasi o *polifase*: ciascuna fase corrisponde ad un avvolgimento e la variazione di questa corrente è rappresentata da curve identiche, sfasate le une rispetto alle altre.

Le correnti polifasi utilizzate più frequentemente sono le correnti bifasi (con due avvolgimenti indipendenti), e le correnti trifasi (con tre avvolgimenti indipendenti).

In questo ultimo caso, invece di utilizzare sei morsetti corrispondenti ciascuno ad un avvolgimento, se ne usano praticamente tre o quattro; nel caso dei

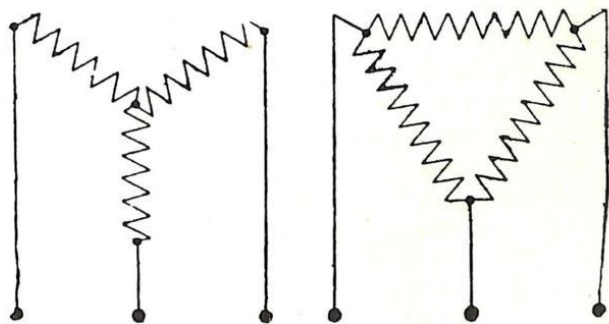



Fig. 13.- Connessioni a stella e a triangolo in trifase.

tre morsetti, gli estremi degli avvolgimenti sono collegati di due in due allo stesso morsetto, e in questo caso si parla di circuito chiuso o a *triangolo*. Se al contrario si unisce uno dei due estremi di ciascun avvolgimento allo stesso morsetto, lasciando l'altro estremo libero e collegato al rispettivo morsetto, si parla di circuito aperto o a *stella*.

Le disposizioni sono le stesse anche nel caso ci siano più di tre avvolgimenti; dato però l'esiguo numero di applicazioni di correnti alternate che non siano la bifase o la trifase, non vengono considerate in questo contesto.

Per estrapolazione, viene definita corrente *monofase* la corrente generata da un alternatore costituito da un solo avvolgimento indotto.

CAPITOLO 3

APPLICAZIONI DELLE AZIONI DINAMICHE DELLE CORRENTI

Si è appena visto che lo spostamento di un conduttore in un campo magnetico, detto in modo più generale e più esatto, la variazione di un campo magnetico rispetto ad un conduttore, da origine ad una forza elettromotrice indotta nel conduttore stesso, o ad una corrente indotta se il circuito è chiuso.

In modo reciproco, quando un conduttore percorso da corrente viene immesso in un campo magnetico, genera a sua volta un campo magnetico che tende ad opporsi al campo esistente; essendo il conduttore mobile, l'azione reciproca dei due campi si traduce in uno spostamento del conduttore in modo che le linee di forza che rappresentano questo campo risultino parallele e di verso contrario a quelle del campo esistente.

Motori in corrente continua

Se si considera lo stesso dispositivo descritto per illustrare il funzionamento dei generatori, vale a dire un cilindro avvolto con 2n conduttori libero di ruotare all'interno di un campo magnetico, e se si fa circolare una corrente continua in questi conduttori, il campo magnetico generato da questa corrente agisce sui conduttori, a causa della presenza del campo magnetico esistente, spostandoli.

L'energia elettrica costituita dalla corrente che circola nell'avvolgimento, si trasforma in energia meccanica, grazie al movimento dell'avvolgimento indotto. Questa energia viene raccolta sull'albero del cilindro, e il sistema, che in precedenza era un generatore, diventa un *motore*.

L'avvolgimento indotto del motore, presenta le stesse caratteristiche di quello del generatore. Esiste una differenza solo per ciò che concerne la posizione delle spazzole.

Se infatti si suppone che la direzione del campo induttore e il verso di rotazione siano uguali per il sistema che funziona come motore e per il sistema che funziona come generatore, il verso della corrente nell'avvolgimento indotto è differente; di conseguenza è differente anche il verso del campo magnetico indotto da questa corrente per il motore, rispetto a quello del generatore.

Da ciò risulta che le spazzole devono essere scalate non nel verso di rotazione, ma nel verso opposto.

Motori in corrente alternata

Allo stesso modo in cui i generatori di corrente continua sono reversibili, e possono convertirsi in motori, a condizione che venga modificata la posizione delle spazzole per consentirne un buon funzionamento, anche gli alternatori possono trasformarsi in motori, a condizione che il loro avvolgimento indotto sia percorso da una corrente alternata, e il loro avvolgimento induttore da una corrente continua che crei il campo induttore.

In questo caso però, il fenomeno risulta molto più complesso a causa delle variazioni periodiche del campo indotto dalla corrente alternata, e l'utilizzo di questi motori, definiti *motori sincroni*, è poco frequente per le loro difficoltà di avviamento e la loro mancanza assoluta di elasticità.

La corrente alternata, viceversa, viene molto utilizzata nei motori definiti *asincroni*. Il campo magnetico creato da un sistema composto da diversi avvolgimenti percorsi ognuno da una corrente elettrica, risulta dalla combinazione dei campi indotti da ciascun avvolgimento.

Ciascuna di queste componenti varia con la corrente da cui ha origine; se le correnti sono scalate l'una rispetto all'altra, perché sono ad esempio generate da un alternatore di corrente polifase, i valori di ogni campo magnetico, considerati separatamente nello stesso istante, sono diversi. Le linee di forza che rappresentano il campo risultante, cambiano di direzione ad ogni istante, come indicato schematicamente in Fig. 1; il campo si trasforma in un *campo rotante*.

Se si suppongono questi avvolgimenti fissi, e se si pone nel campo generato un cilindro mobile su cui sono montati dei conduttori che formano un circuito chiuso, il flusso che passa attraverso la superficie rotante dei conduttori varia, a condizione che il campo si sposti. La variazione del flusso, crea in questi conduttori una corrente indotta che genera un nuovo campo magnetico.

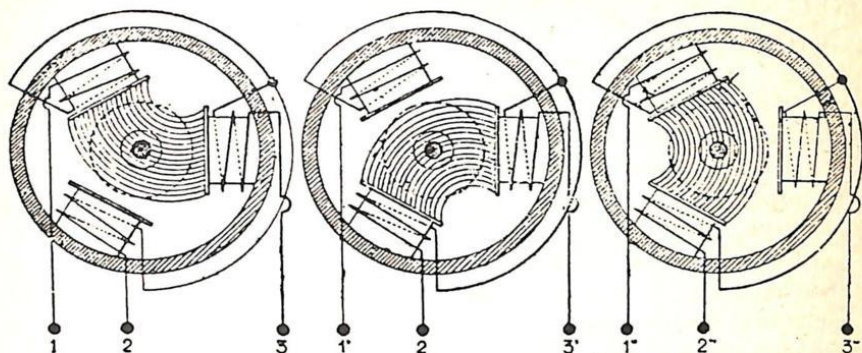



Fig. 1.- Le linee di forza che rappresentano il campo risultante, cambiano di direzione in ogni istante. Questo campo si trasforma in campo rotante.

Le azioni reciproche del campo rotante e di questo nuovo campo indotto provocano un movimento dell'organo mobile, per cui il sistema diventa un motore, in cui il cilindro viene definito *rotore*, mentre l'avvolgimento fisso viene definito *statore*.

Il rotore tende a seguire il campo rotante nel suo movimento, ma la resistenza che deve vincere gli impedisce di raggiungere la velocità di quest'ultimo, per cui non c'è sincronismo tra i due; da qui il nome generico di *motori asincroni* dato a questa categoria di apparecchiature.

Se lo statore di questi motori è costituito da un solo avvolgimento, corrispondente ad una corrente alternata monofase, il campo indotto non è un campo rotante, ma un campo alternato: il suo valore varia con la corrente che lo genera e secondo la stessa legge, passando successivamente da zero al valore massimo. Si ha lo stesso effetto che provoca una corrente che si viene a creare nei conduttori del rotore come conseguenza delle variazioni del campo induttore, ma poiché questo campo si annulla periodicamente, non si ha lo spostamento dei conduttori stessi.

Per questo motivo è opportuno creare un campo induttore sfasato che si sovrapponga al campo principale tramite un dispositivo che consista, per l'avviamento, in un avvolgimento ausiliario sullo statore, nel quale la corrente sia sfasata rispetto alla corrente principale; il campo risultante dalla combinazione di questi due, risulta essere un campo rotante, che permette la messa in moto del rotore.

Quando il rotore è in movimento, le variazioni del campo magnetico principale sono sufficienti per mantenere la rotazione dei conduttori mobili.

Conclusioni

Da quanto esposto, risulta che il funzionamento di tutte le macchine elettriche è basato sulle azioni reciproche dei campi magnetici.

Se queste azioni sono provocate da un movimento, si ha consumo di energia meccanica e trasformazione in energia elettrica: si è allora in presenza di *generatori*.

Se i campi magnetici, da cui si sfruttano le azioni reciproche, vengono creati direttamente, si ha un consumo di energia elettrica per la creazione degli stessi, e questa energia si trasforma in energia meccanica, tramite lo spostamento dei conduttori che sono attraversati da questa energia elettrica.

In entrambi i casi, la quantità di energia ottenuta è strettamente legata alla quantità di energia consumata, allo stesso modo in cui l'energia consumata è strettamente connessa con l'energia utilizzata o ottenuta.

Il legame esistente tra queste quantità di energia è definito dal *rendimento* dell'apparecchiatura, che rappresenta il rapporto tra la quantità di energia ottenuta e la quantità di energia utilizzata. Questo parametro avrà sempre un valore inferiore all'unità, poiché la quantità di energia ottenuta non potrà mai essere maggiore alla quantità di energia utilizzata, non essendoci creazione, ma semplicemente trasformazione di energia; nella realtà inoltre, questa *trasformazione* richiede anche una perdita di energia, per cui anche l'unità risulta un valore non ottenibile.

Di conseguenza, è importante cercare di ridurre questa perdita il più possibile, per poter ottenere il massimo rendimento dalla macchina. E' opportuno perciò che i suoi organi siano convenientemente dimensionati, e in particolare che il campo magnetico, sede della trasformazione dell'energia, abbia il massimo effetto utile.

E' evidente che esistono delle relazioni tra le dimensioni e le caratteristiche dei vari organi della macchina elettrica, e le quantità di energia persa e ottenuta; le considerazioni fatte in precedenza, permettono di stabilire queste relazioni, e dedurne le regole costruttive delle macchine.

Bisogna tener presente, in generale, che tutte le macchine sono definite dalla quantità di energia che sono in grado di trasformare nell'unità di tempo, senza pericolo per i vari organi, vale a dire che sono definite dalla loro *potenza nominale*.

Inoltre, la potenza meccanica, che si manifesta dal movimento dei suoi organi, dipende dalla velocità di rotazione del suo organo principale, quando,

come accade nelle macchine elettriche, il movimento è di tipo rotatorio, e dalla coppia motrice, secondo la relazione:

$$P = C\,\omega$$

dove:

P = potenza,
C = coppia motrice,
ω = velocità di rotazione.

La velocità, può essere definita come numero di rivoluzioni al minuto N, per mezzo della relazione:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

dove π mette in relazione la lunghezza della circonferenza con il diametro, e vale approssimativamente 3,14.

La potenza elettrica nel circuito, è definita dalla forza elettromotrice E e dalla corrente I che lo percorre, secondo la relazione:

$$P = EI$$

Poiché E viene espresso in Volt, e I in Ampere, la potenza viene espressa in Watt (1.000 watt = 1 Kilowatt = 1,36 cavalli).

Basta perciò conoscere i valori di C, ω e N, oppure di E ed I, in ciascun caso particolare, perché la potenza della macchina sia definita sia dal punto di vista meccanico, che da quello elettrico.

CAPITOLO 4

MOTORI ELETTRICI

Il motore è un elemento indispensabile in un gran numero di apparecchiature elettroniche. La conoscenza del suo modo di operare e delle sue proprietà, è perciò fondamentale per qualunque tecnico o appassionato che utilizzi questo componente nelle suddette apparecchiature, al fine di poter scegliere il modello più idoneo e ottenerne il maggior rendimento possibile.

La missione fondamentale di un motore elettrico, è quella di trasformare l'energia elettrica che gli viene applicata,in energia meccanica che servirà a porre in movimento i meccanismi dell'apparecchiatura in cui è installato.

Il funzionamento di un motore, in generale, si basa sulle proprietà magnetiche della corrente elettrica, e sulla possibilità di creare, partendo da questa, una determinata forza di attrazione e repulsione che verrà applicata ad un asse per generare un movimento rotatorio.

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di un motore è basato sulla legge di *Faraday*, per la quale *in un qualunque conduttore che si muove in un campo magnetico creato da una calamita si genera una differenza di potenziale tra i suoi estremi, proporzionale alla velocità di spostamento del conduttore stesso.*

Se, al posto di un conduttore rettilineo con i terminali aperti si utilizza un anello conduttore con gli estremi collegati ad una determinata resistenza, e lo si fa ruotare all'interno di un campo magnetico, in modo che vari il flusso magnetico abbracciato dallo stesso, si potrà rilevare la presenza di una corrente elettrica che circola attraverso la resistenza, e che cesserà di esistere nel mo-

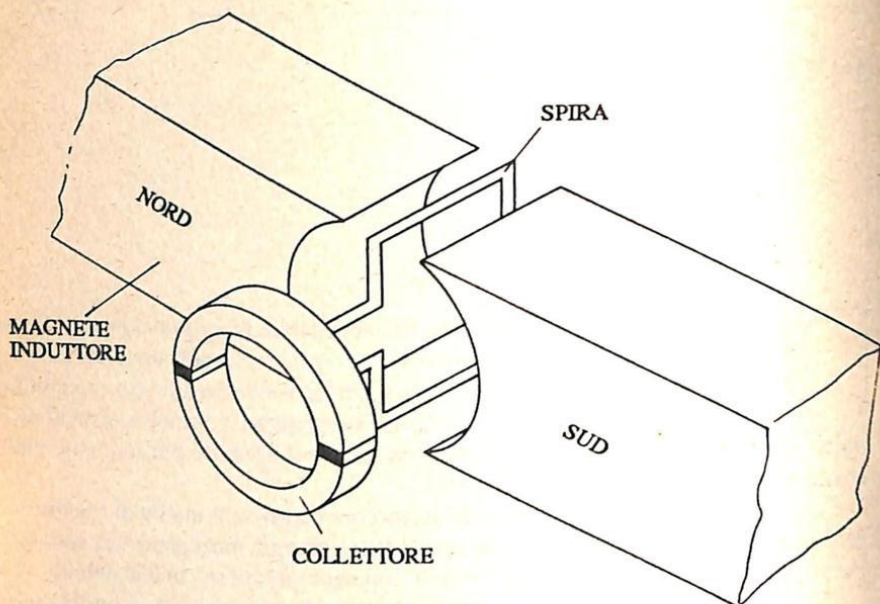



Fig. 1.- Schema di principio della struttura di base di un motore elettrico, rappresentato da una spira rotante all'interno di un campo magnetico.

mento in cui verrà fermato il movimento di rotazione.

Normalmente, in un motore vengono utilizzate un certo numero di spire avvolte su di un nucleo magnetico di forma appropriata, e in alcune occasioni viene sostituito il magnete permanente che crea il campo magnetico, con un elettromagnete, che produce lo stesso effetto quando gli viene applicata una corrente di eccitazione.

Quest'ultimo elemento (magnete permanente o elettromagnete) viene definito *induttore*, e l'insieme delle spire e del nucleo mobile costituisce l'*indotto.*

Il verso della corrente elettrica che circola nell'indotto, viene definito dalla legge di *Lenz*, per la quale *ogni variazione che viene prodotta in un campo magnetico, tende a creare un effetto di verso opposto, che compensi e an-*

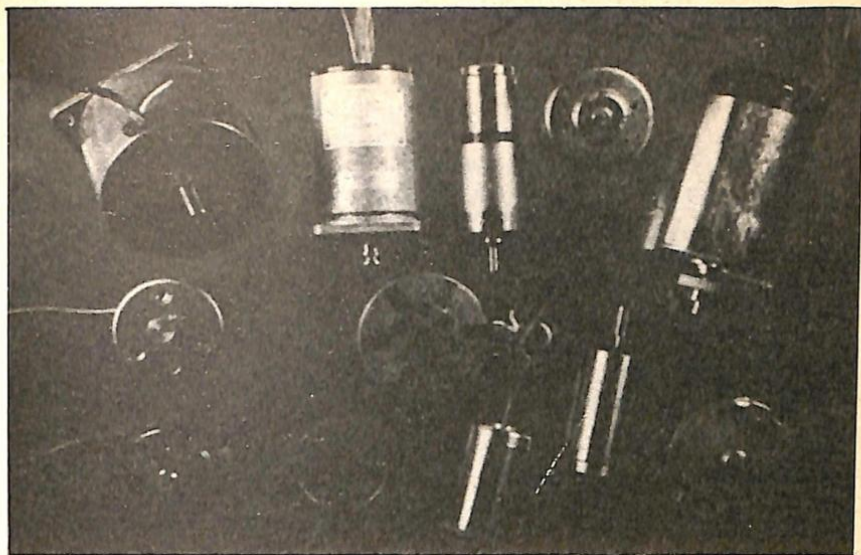



Fig. 2.- Insieme di motori elettrici di diversi modelli e tipi, normalmente utilizzati nelle apparecchiature elettroniche.

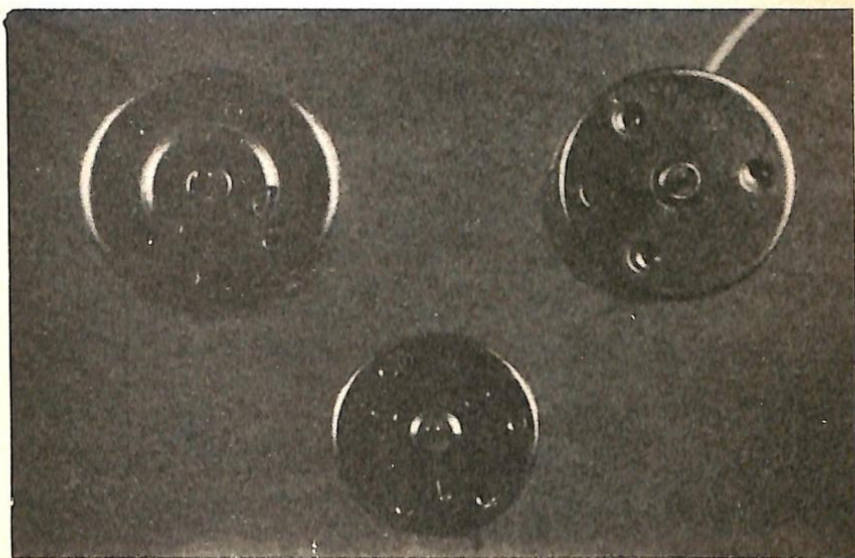



Fig. 3.- Motori in corrente continua. Questi modelli sono utilizzati nei registratori a cassetta.

nulli la causa che lo ha generato.

Se questa legge viene applicata nel caso in esame, si può dire che la corrente indotta creerà un campo magnetico che si oppone al movimento della stessa, il ché richiederà una certa energia per mantenere il movimento, che dipenderà logicamente dall'intensità della corrente generata e dal valore della resistenza di carico, calcolata tramite il prodotto dell'energia consumata dal carico per il rendimento di conversione.

Tutti i fenomeni suddetti, corrispondono ad un effetto opposto a quello che avviene in un motore; con il sistema descritto, viene generata una corrente elettrica, partendo da un movimento meccanico, e questo fenomeno corri-

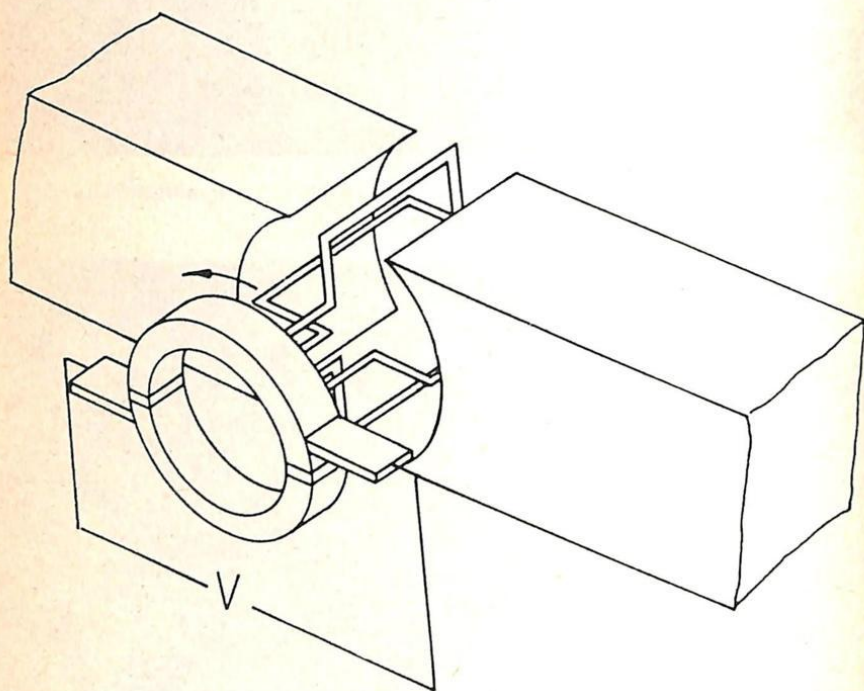



Fig. 4.- Quando alla spira viene applicata una differenza di potenziale elettrica esterna, comincia a ruotare. Si osservino le posizioni di massimo e minimo flusso magnetico.

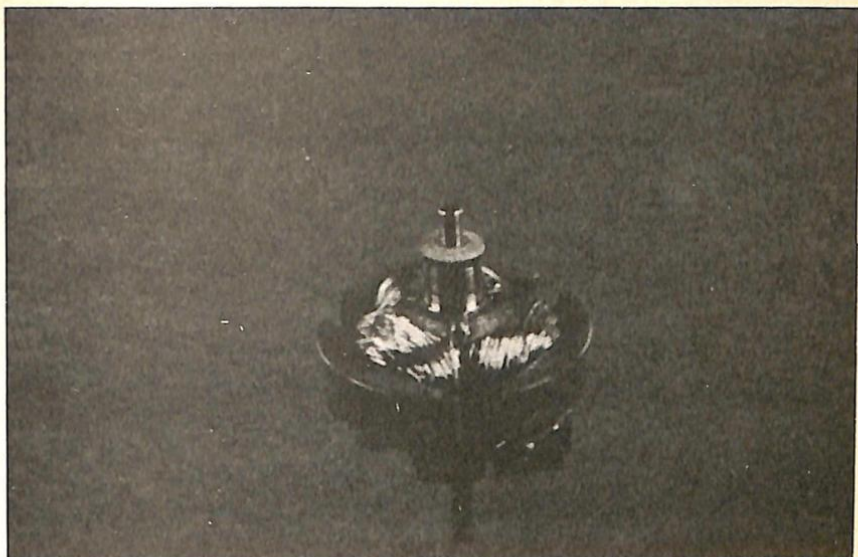



Fig. 5.- Dettaglio dell'indotto, o rotore, di un motore in corrente continua. Nella parte superiore si può osservare il collettore.

sponde al principio di funzionamento di una *dinamo*.

Per ottenere l'effetto contrario, è sufficiente invertire le spazzole, e se al posto di ricavare corrente dall'indotto, gli si applica una certa tensione esterna, questa produrrà una certa corrente elettrica che circola nelle spire, che cominciano a ruotare.

E' importante considerare che, tenendo conto della legge di Lenz citata precedentemente, la rotazione dell'indotto provoca nello stesso una determinata tensione elettrica, di verso contrario a quella esterna, che tenderà ad opporsi al passaggio della corrente per compensare le variazioni del flusso magnetico prodotto, definita *forza controelettromotrice*.

Caratteristiche

Normalmente, i motori sono caratterizzati da due parametri che esprimono direttamente le loro proprietà. Questi parametri sono:

- velocità di rotazione.
- coppia motrice.

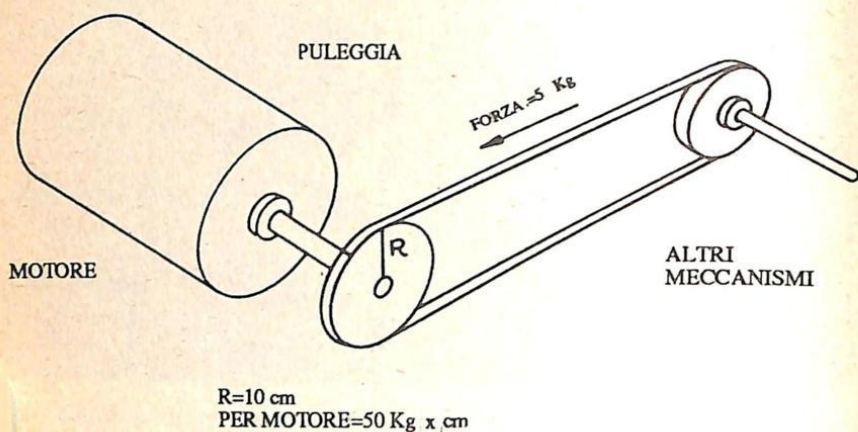



Fig. 6.- Uno dei parametri fondamentali che caratterizzano un motore, è la coppia che relaziona la forza di attuazione alla distanza dall'asse dello stesso.

La *velocità di rotazione* indica il numero di giri per unità di tempo effettuati dal motore, e dipende completamente dalla forma costruttiva dello stesso, dalla tensione di alimentazione, e dal carico meccanico accoppiato al suo asse, anche se quest'ultimo non viene considerato in un tipo particolare di motore definito *sincrono*.

Le unità di misura utilizzate sono i *giri al minuto* (g.p.m.), e le *giri al secondo* (g.p.s.).

La *coppia motrice*, esprime la forza di attuazione del motore, e dipende logicamente dalla potenza che questi è in grado di sviluppare, e dalla velocità di rotazione dello stesso.

Il concetto di coppia, diventa importante nel momento della scelta del modello più adeguato per una determinata applicazione; viene definita come la forza che è in grado di vincere il motore, moltiplicata per il raggio di una puleggia.

Questo significa che non è la stessa cosa muovere, ad esempio, una puleggia che trasmette ad una cinghia una forza di 10 Kg., con un raggio di 5 centimetri, e una puleggia, che trasmetta la stessa forza, ma con un raggio di

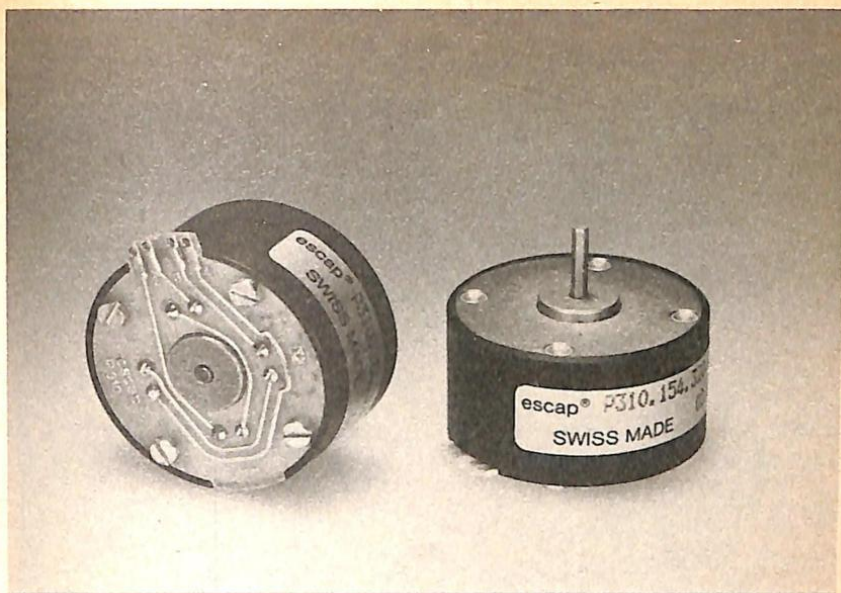



Fig. 7.- Motore passo-passo a disco magnetico.

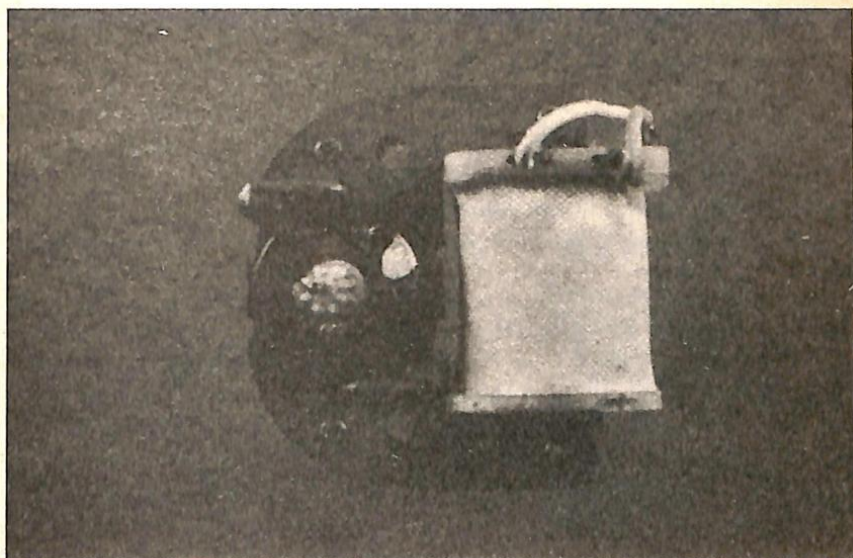



Fig. 8.- Motore in corrente alternata del tipo ad induzione, o asincrono.

10 centimetri; in quest'ultimo caso, la coppia sarà doppia rispetto a prima.

Le unità di misura sono espresse in Kg.cm (*Kilogrammi per centimetro*), oppure in g.cm (*grammi per centimetro*).

Oltre che a questi fattori, bisogna tener conto anche delle condizioni di avviamento, della potenza assorbita, e del fattore di potenza. Esiste una relazione matematica che lega i vari parametri che, come si è già detto, non sono indipendenti fra di loro:

$$M = 0{,}95 \cdot \frac{P}{N}$$

dove M è la coppia motrice espressa in Kg.cm, P è la potenza assorbita in watt, e N è la velocità in giri al minuto (g.p.m.).

Classificazione

In funzione della corrente utilizzata per l'alimentazione del motore, che definisce completamente le caratteristiche costruttive dello stesso, si possono classificare i motori in tre grandi categorie:

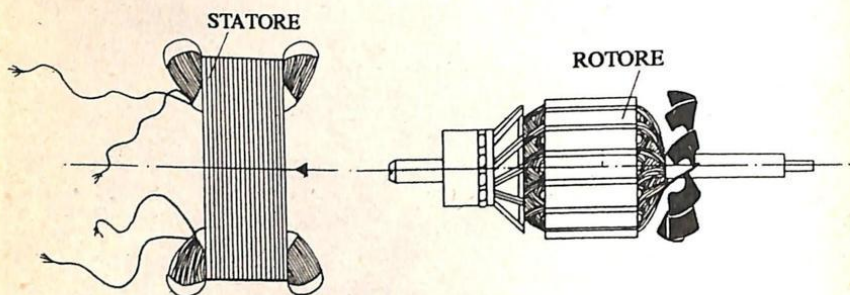



Fig. 9.- Sezione schematica di un motore, in cui si possono osservare i due elementi che generano il movimento: lo statore ed il rotore.

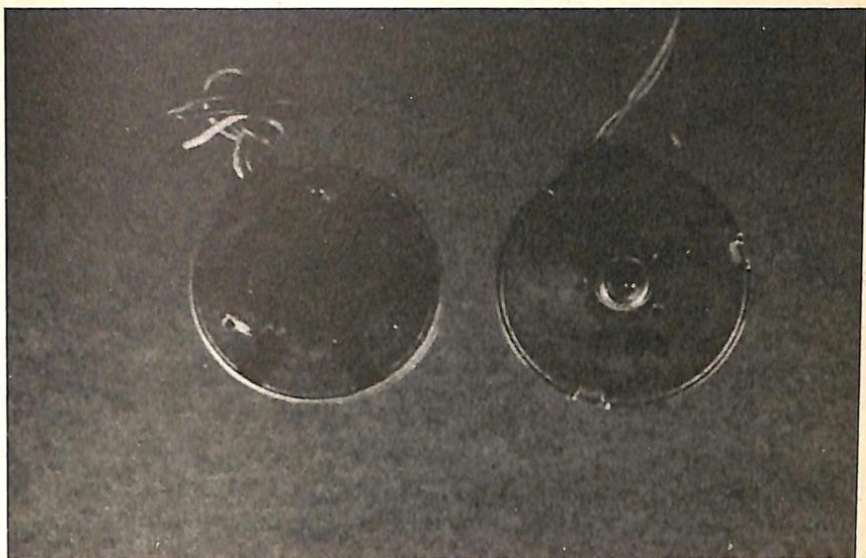



Fig. 10.- Motori in corrente alternata di tipo sincrono.

- *motori in corrente continua,*
- *motori in corrente alternata,*
- *motori universali.*

Nei *motori in corrente continua*, come indica già il loro nome, è necessario applicare all'indotto una corrente continua per ottenere il movimento, così come è necessario applicare il medesimo tipo di corrente all'induttore, nel caso questi sia costituito da un elettromagnete; quest'ultima corrente viene definita *corrente di eccitazione.*

Costruttivamente, è costituito da un induttore cilindrico vuoto (magnete o elettromagnete) che contiene un certo numero di coppie di poli magnetici (nord e sud), definito *statore.*

Al suo interno c'è l'indotto, o *rotore*, anch'esso cilindrico, sul quale è presente l'avvolgimento. L'asse è accoppiato mediante bronzine o cuscinetti che ne permettono la rotazione, e dispone di una superficie di contatto montata su di una superficie definita *collettore*, sulla quale appoggiano i contatti esterni o *spazzole.*

I *motori in corrente alternata* sono quelli che vengono alimentati con questo tipo di corrente, e si possono suddividere in due gruppi, con caratteri-

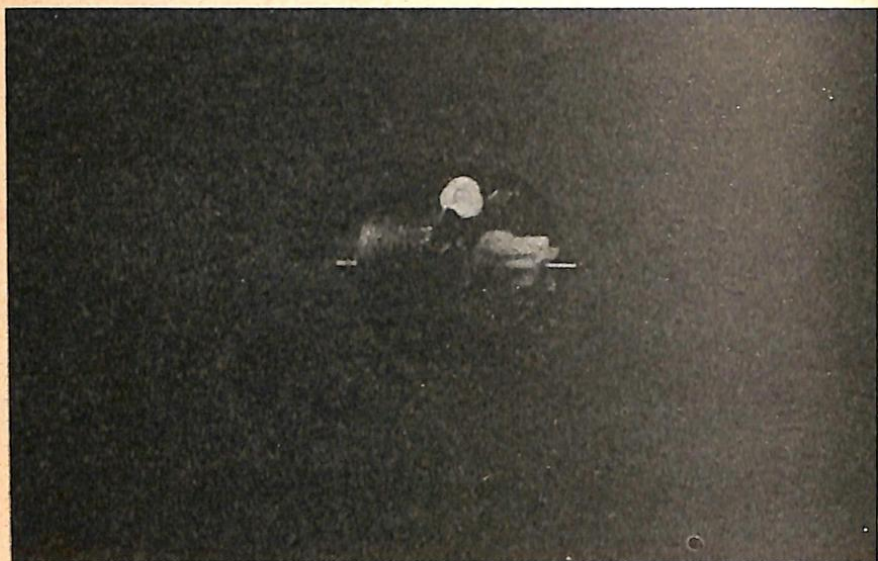



Fig. 11.- Rotore, o indotto, di un motore in alternata ad induzione. Si osservi che non è presente nessun tipo di contatto di eccitazione.

stiche abbastanza differenti tra di loro:

- *motori asincroni*,
- *motori sincroni.*

I primi, conosciuti anche con il nome di motori ad induzione, basano il loro funzionamento sull'effetto che produce un campo magnetico alternato applicato ad un induttore, o *statore*, su di un *rotore* con una serie di spire senza nessun collegamento con l'esterno, nelle quali si genera una corrente per effetto trasformatore.

Pertanto, in questo sistema è necessaria solamente una connessione di alimentazione allo statore, e vengono eliminate le spazzole necessarie in altri tipi di motori.

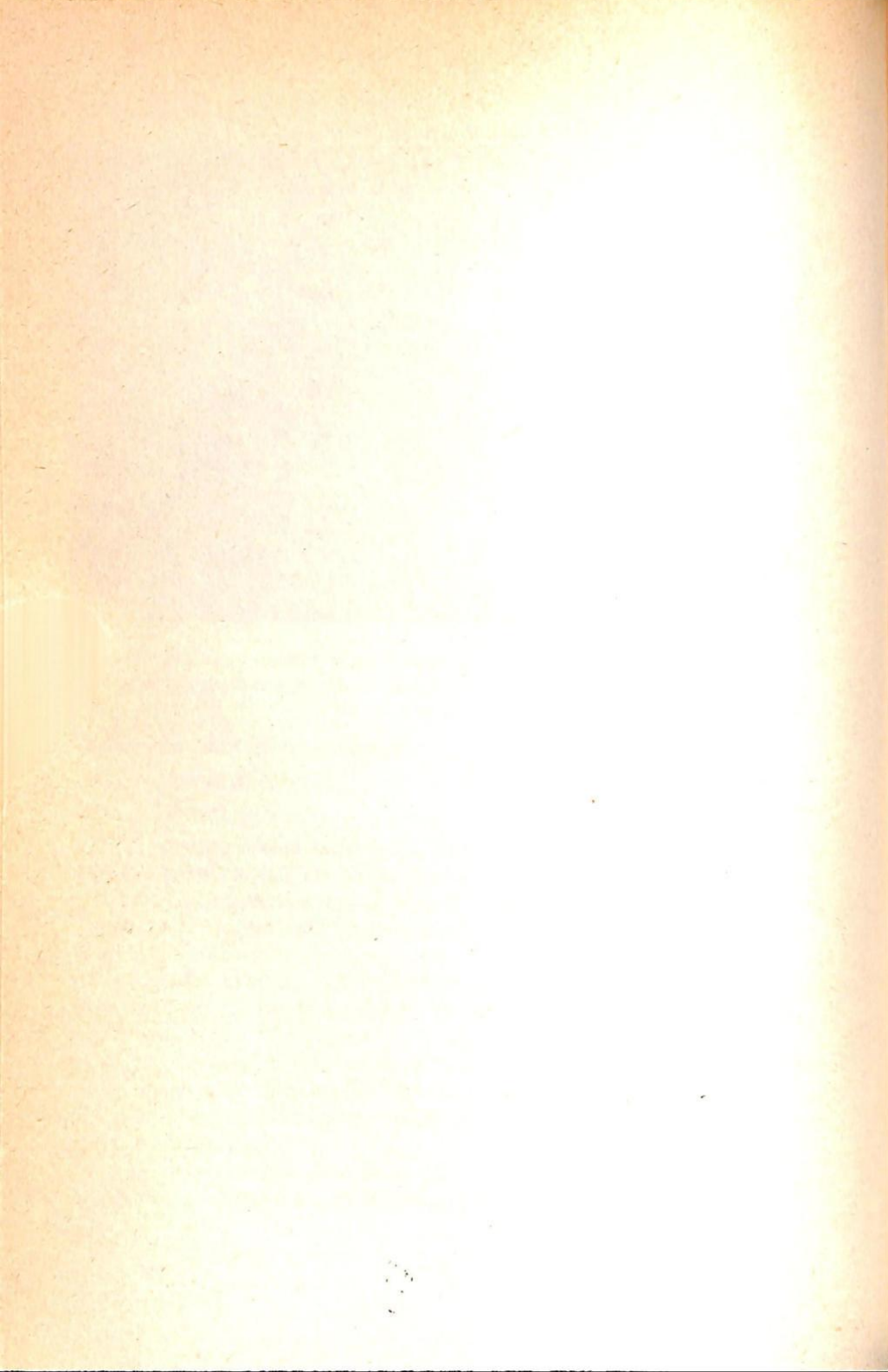
I motori sincroni sono costituiti da un indotto fisso, che forma pertanto lo *statore*, al quale viene applicata una corrente alternata, e da un induttore, o *rotore*, costituito da un magnete, o elettromagnete, con un certo numero di coppie di poli magnetici.

Il campo variabile dello statore fa ruotare il rotore ad una velocità fissa e costante di sincronismo, che dipende dalla frequenza della tensione alterna-

ta applicata. Da questo deriva la definizione di sincrono.

I *motori universali* sono quelli che possono essere alimentati con correnti sia continue che alternate, senza che subiscano variazioni nelle loro proprietà.

Fondamentalmente rispondono agli stessi principi costruttivi dei motori in corrente continua, dove però sia l'induttore che l'indotto sono alimentati con la stessa corrente, poiché sono collegati entrambi in serie al circuito di alimentazione.

CAPITOLO 5

MOTORI IN CONTINUA

Come detto precedentemente, un motore in corrente continua è composto da un magnete fisso, o elettromagnete, che costituisce l'induttore o statore, e da un avvolgimento definito indotto, o rotore, che è in grado di ruotare all'interno dello statore, quando riceve una corrente continua di eccitazione. Di seguito si analizzerà in maggior dettaglio il modo in cui si origina il movimento, e le diverse fasi che compongono lo stesso.

Considerando un motore elementare come quello rappresentato in Fig. 1, al passaggio di una corrente nella bobina si creerà nella stessa un campo magnetico che la farà ruotare a causa delle forze di attrazione e repulsione che si generano rispetto al magnete dello statore.

Durante la rotazione, si generano inoltre, una serie di effetti che condizionano la costruzione del motore; il primo di questi si produce quando si trovano contrapposti due poli di segno opposto, per cui l'attrazione sarà massima e la bobina tenderà a fermarsi. Per inerzia, però, supererà questo punto, e il verso di rotazione si invertirà e diventerà contrario, fermandosi all'estremo dell'oscillazione completa.

Se nel momento in cui sono contrapposti i poli opposti si inverte il verso di circolazione della corrente nella bobina, automaticamente si produrrà un cambiamento di segno nei poli magnetici creati dalla stessa, dando origine a delle forze di repulsione tra gli stessi che la obbligheranno ad effettuare un ulteriore semigiro, dopo il quale il verso della corrente viene nuovamente invertito, e così via.

Il metodo utilizzato per effettuare questo cambiamento nel verso della corrente, è quello di dividere l'anello del collettore, da cui la bobina riceve la corrente di alimentazione, in due parti uguali, separate da un materiale isolan-

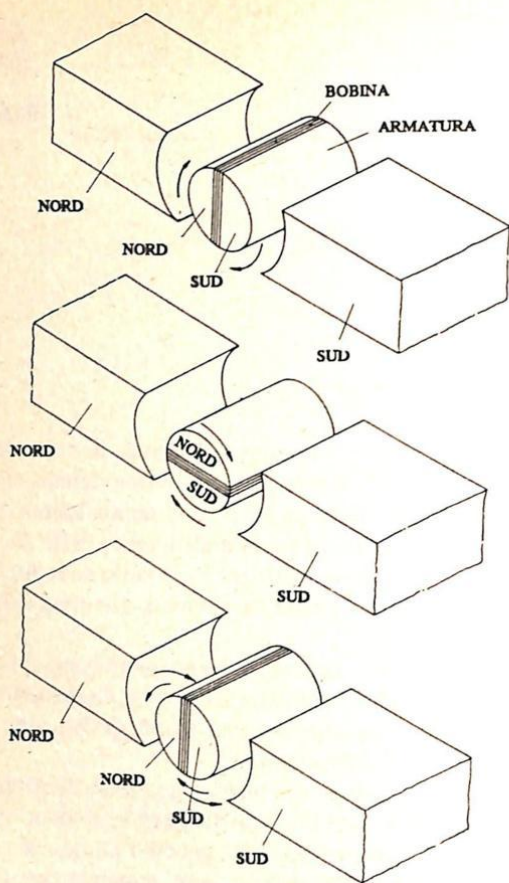



Fig. 1.- Sequenza di rotazione dell'indotto di un motore in continua, in assenza di commutazione di polarità nell'avvolgimento:
1) la forza di repulsione è massima all'inizio della rotazione,
2) l'indotto è ruotato di 90° e si mantiene in rotazione,
3) l'attrazione è massima, fermando il motore dopo una oscillazione.

te, che ruotano scivolando su due contatti elettrici fissi, o spazzole, collegati al polo positivo e negativo rispettivamente.

In questo modo, i due contatti si scambieranno due volte per ciascuna ro-

tazione sui due semianelli, invertendo così il verso di circolazione della corrente nella bobina.

Struttura

Un motore composto da una sola bobina avrà un movimento poco uniforme, a causa del fatto che le forze magnetiche che lo fanno ruotare variano con la posizione relativa della bobina e del magnete. Per due volte ad ogni rotazione, darà uno strappo nel momento in cui avverrà l'inversione della polarità.

Per aumentare la potenza, ed avere un movimento più costante, la parte mobile, o rotore, è composto da vari avvolgimenti di filo isolato, indipendenti tra di loro, avvolti su di un supporto di ferro dolce, definito *armatura*, e collegati a due sezioni del collettore, che sarà suddiviso in un numero di parti pari al doppio del numero di avvolgimenti del rotore.

Queste superfici conduttrici vengono definite scarpe polari.

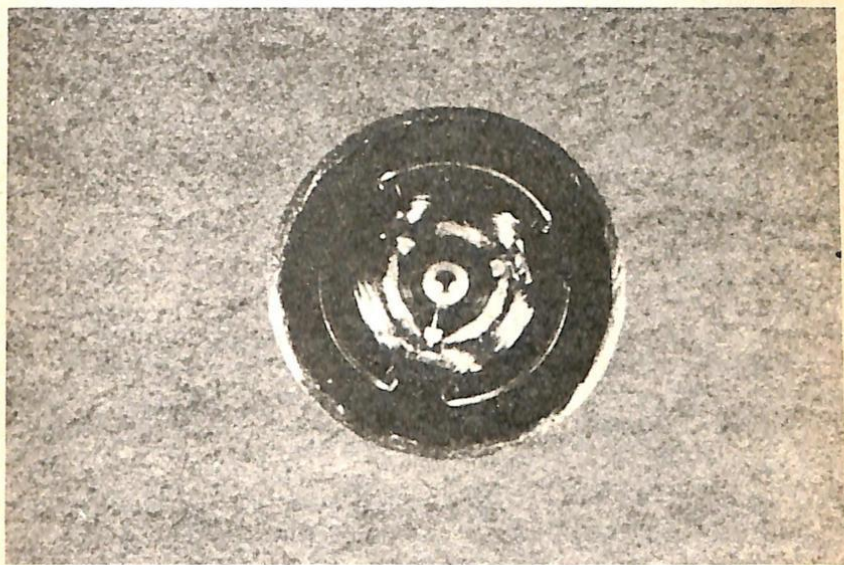



Fig. 2.- Interno di un motore in corrente continua. Si osservi il magnete permanente dell'induttore che circonda l'indotto.

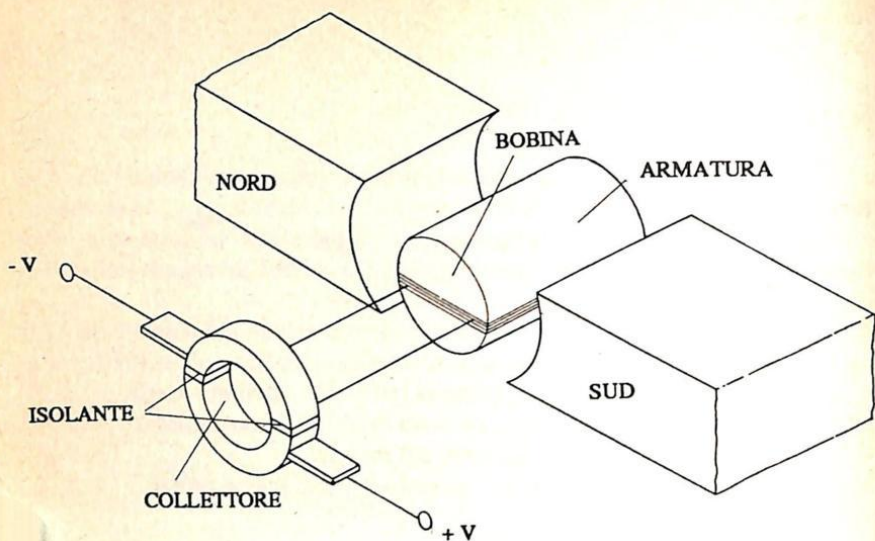



Fig. 3.- Per far si che si mantenga la rotazione, è opportuno dividere il collettore in due parti con lo scopo di invertire la polarità nel momento più opportuno.

Inoltre, il numero di poli magnetici esistenti nell'induttore, è solitamente superiore a due, con la presenza di magneti addizionali, ed il motore tetrapolare è uno dei più utilizzati.

Tipi di motori in corrente continua

Attualmente, esiste un'ampia gamma di tipi e modelli di motori in corrente continua, costruiti secondo distinti progetti di rotore e statore, che presentano tutti i propri pregi e difetti. Tra questi, se ne possono distinguere alcuni tipi particolari:

- motori che utilizzano un elettromagnete come induttore,
- motori con l'induttore costituito da un magnete permanente,
- motori con il rotore senza armatura.

Il primo dei modelli indicati viene utilizzato per applicazioni di media e

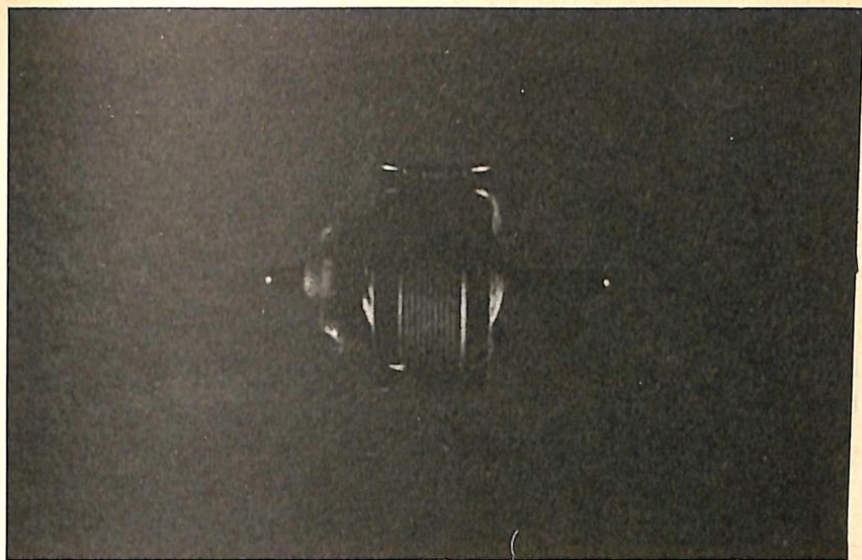



Fig. 4.- Indotto del motore in continua. Il collettore è posto sulla destra.

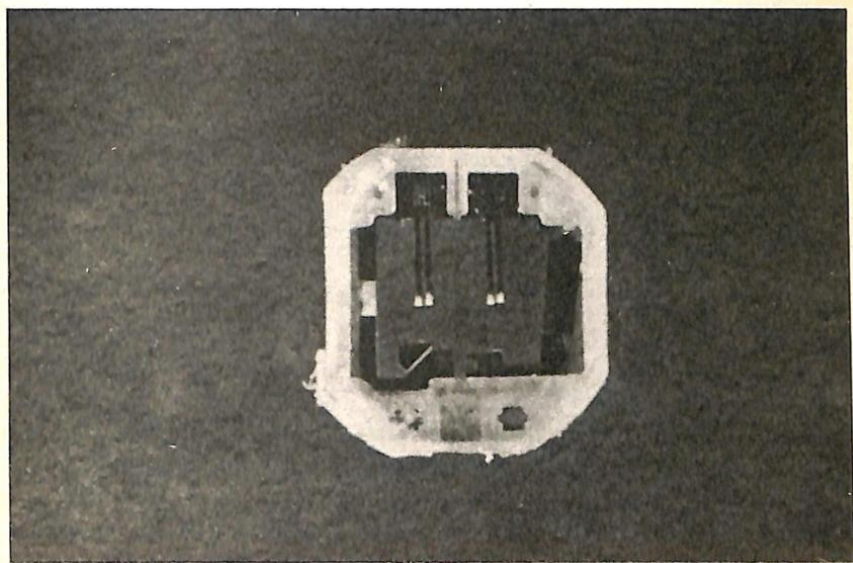



Fig. 5.- Dettaglio dei contatti che forniscono la tensione e la corrente al collettore del motore.

grande potenza, e richiede, per le dimensioni che assume, un magnete molto grande nello statore.

Connessione degli avvolgimenti

Il motore è composto da due avvolgimenti, a cui è necessario fornire una determinata corrente (elettromagnete di statore e rotore), ed esistono in pratica tre differenti sistemi per collegare questi avvolgimenti, da cui si ottengono differenti caratteristiche di funzionamento.

Motori serie : in questo caso, gli avvolgimenti di induttore e indotto sono collegati in serie, con gli estremi rimasti liberi collegati all'alimentazione. Pertanto, la corrente sarà la stessa per l'induttore e l'indotto.

L'unico inconveniente in questa forma di connessione è che nel momento dell'avviamento la corrente che circola è molto elevata, a causa del fatto che il motore è inizialmente fermo, per cui non viene prodotta una forza controelettromotrice, e l'unica resistenza che si oppone al suo passaggio è quella del filo, che deve essere molto bassa.

Dopo aver superato lo spunto iniziale, quando il rotore è in rotazione, questa elevata corrente diminuisce, fino a raggiungere il valore normale, o di *mantenimento*.

Per evitare pericoli di danneggiamento a causa del fenomeno appena descritto, si utilizza normalmente una resistenza variabile, o *reostato*, in serie con

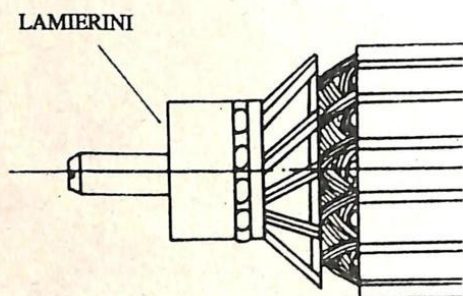



Fig. 6.- Per aumentare la potenza e ottenere un movimento più costante, si suddivide il collettore in varie parti collegate ai differenti avvolgimenti del rotore.

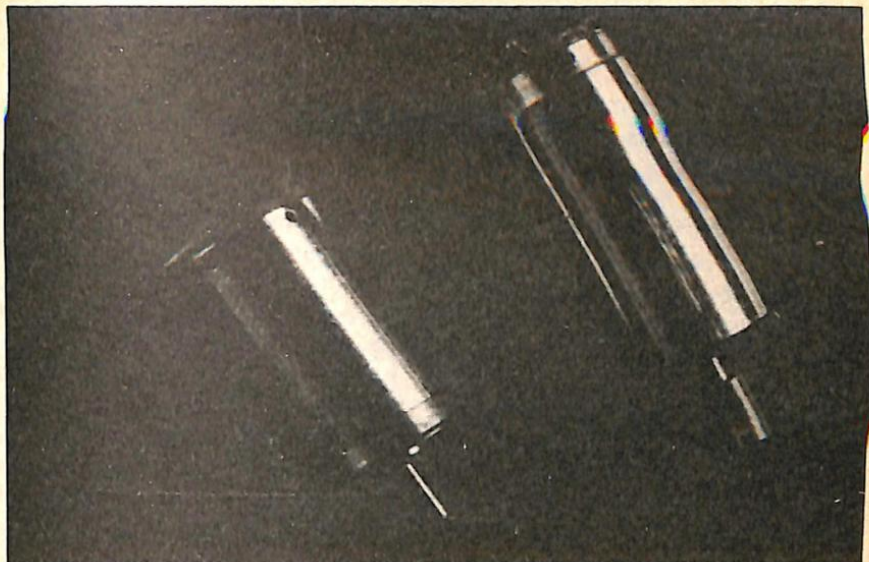



Fig. 7.- Due modelli di motori in continua del tipo a bassa inerzia, il cui indotto non è provvisto di armatura.

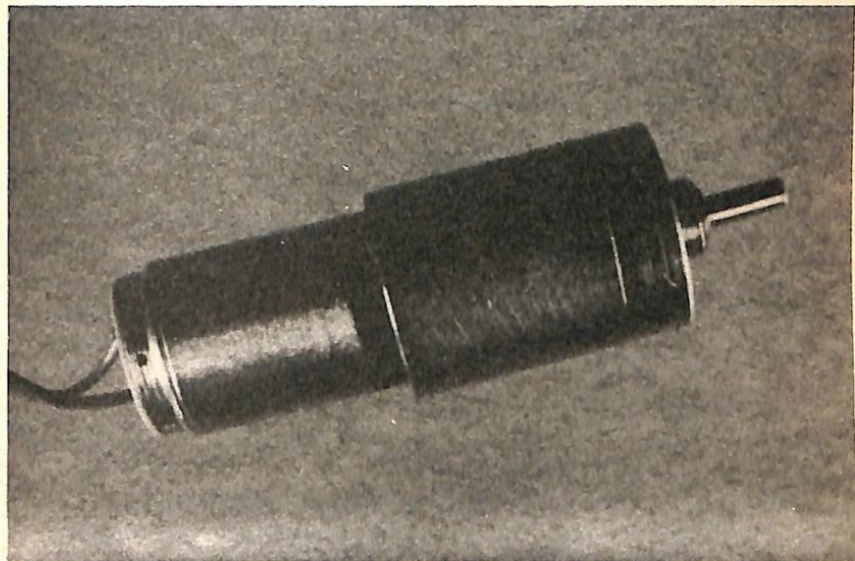



Fig. 8.- Altro modello di motore senza armatura, accoppiato ad un riduttore di velocità.

gli avvolgimenti, che li protegge inizialmente, e che successivamente si riduce a zero.

Le caratteristiche più salienti di questi motori sono:

- elevata coppia di avviamento,
- velocità variabile con il carico applicato all'asse,
- danneggiamento difficoltoso in caso di sovraccarico.

Motori in derivazione : questo tipo di collegamento consiste nel connettere l'induttore e l'indotto in parallelo, o derivazione, collegandoli ambedue alla tensione di alimentazione.

In questo caso, ogni avvolgimento lavorerà ad una tensione costante, per cui il flusso magnetico dell'induttore sarà ugualmente costante, e perciò la velocità risultante si mantiene abbastanza uniforme anche al variare del carico meccanico.

Per gli stessi motivi che nel caso precedente, nel momento dell'avviamento circola una corrente molto elevata nell'induttore, per cui viene anche qui utilizzato un reostato di avviamento, salvo che nei piccoli motori, in cui l'indotto è formato da un gran numero di spire di filo sottile, la cui resistenza propria evita il problema detto.

Le caratteristiche di questo sistema sono:

- coppia di avviamento debole,
- cattiva sopportazione dei sovraccarichi,
- velocità costante e indipendente dal carico.

Motori ad eccitazione composta : in questo tipo di motori si effettua una combinazione tra l'eccitazione serie e quella in derivazione, per cercare di ot-

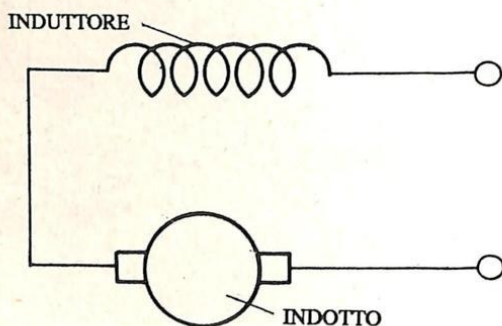



Fig. 9.- Connessione dell'induttore e dell'indotto nella configurazione serie.

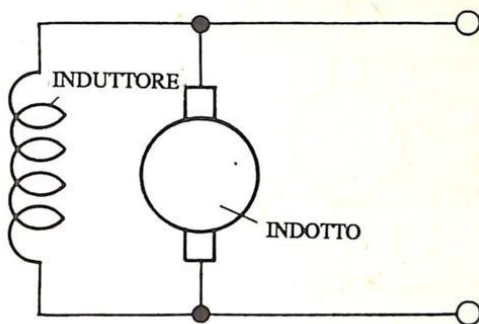



Fig. 10.- Connessioni dell'induttore e dell'indotto con il motore in derivazione.

tenere le caratteristiche di entrambi i tipi.

Per realizzare questa connessione, si sfrutta un induttore separato in due avvolgimenti, di cui uno viene collegato in derivazione con l'indotto, mentre l'altro viene collegato in serie, in modo però, che la corrente che circola attraverso quest'ultimo sia di verso contrario a quella che circola nell'altro.

In questo modo si riesce ad avere una velocità di rotazione sufficientemente costante rispetto al carico, con una coppia di avviamento sufficientemente debole.

I motori costruiti con un induttore formato da un magnete permanente, si comportano in un modo molto simile ai motori con connessione in derivazione, poiché il flusso magnetico risulta costante. La corrente di alimentazione circolerà solamente nell'indotto, e si produrrà, come nel caso precedente, una intensità elevata all'avviamento.

Sia la coppia, che la velocità, dipenderanno dalla tensione applicata all'indotto, poiché questi tre fattori sono tra di loro in relazione.

Motori senza armatura

I motori senza armatura sono composti da uno statore formato da un magnete cilindrico, nel cui interno è presente un rotore costituito da vari avvolgimenti che formano, a loro volta, una struttura cilindrica senza alcun nucleo di supporto al suo interno.

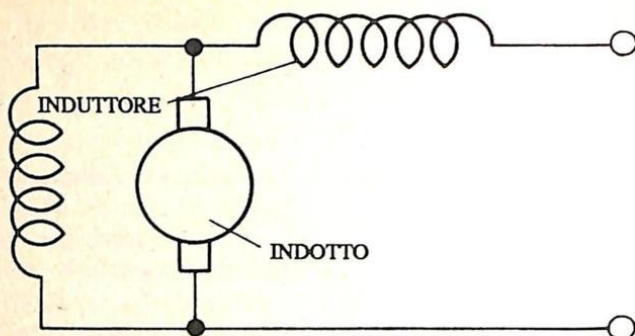



Fig. 11.- Connessioni dell'induttore e dell'indotto nel sistema ad eccitazione composta.

Il principale vantaggio di questi motori è quello di avere una bassa inerzia, per il fatto che non devono muovere una massa relativamente elevata; la tensione necessaria per l'avviamento è perciò sufficientemente bassa, per cui si rendono specialmente utili per applicazioni in servomeccanismi, in cui i motori utilizzati devono funzionare con un ampio range di tensioni di alimentazione.

CAPITOLO

MOTORI AD INDUZIONE

Dopo aver conosciuto i motori in corrente continua, verranno di seguito descritti i principi di base e il funzionamento di un tipo di motore che viene utilizzato in un elevato numero di applicazioni: il motore *asincrono*, eccitato da una corrente alternata, e conosciuto anche come motore ad induzione.

Principi di base dei motori asincroni

Il principio di funzionamento di questi motori, è basato sugli esperimenti che fece Ferraris nell'anno 1885, nei quali utilizzo una calamita a ferro di cavallo con un asse verticale che ne permettesse il libero movimento, e la pose nelle vicinanze di un disco metallico che poteva anch'esso ruotare sullo stesso asse.

Facendo ruotare la calamita, osservò che, quantunque non ci fosse contatto, il disco metallico ruotava nello stesso verso della stessa.

Questo fatto, implica che ruotando una calamita si genera un campo rotante, e crea sul disco delle correnti elettriche indotte le quali, ricordando la legge di Lenz, genereranno a loro volta un altro campo magnetico che tenderà ad opporsi al primo; ne risulterà, come conseguenza, una rotazione del disco, poiché gli estremi della calamita si troveranno sempre di fronte alle stesse zone di questo, e la situazione risulterà essere simile a quella iniziale in cui tutto era fermo, poiché gli estremi ruotano entrambi alla stessa velocità.

Nel momento in cui il disco raggiungerà una velocità esattamente identica a quella della calamita, spariranno le correnti indotte sullo stesso per cui ritarderà, causando la riformazione delle suddette correnti.

Il risultato sarà che il disco sarà sempre leggermente ritardato rispetto alla calamita, per cui la sua velocità sarà leggermente inferiore a quella di quest'ultima.

Per questo motivo questo sistema viene definito *asincrono*, poiché le ve-

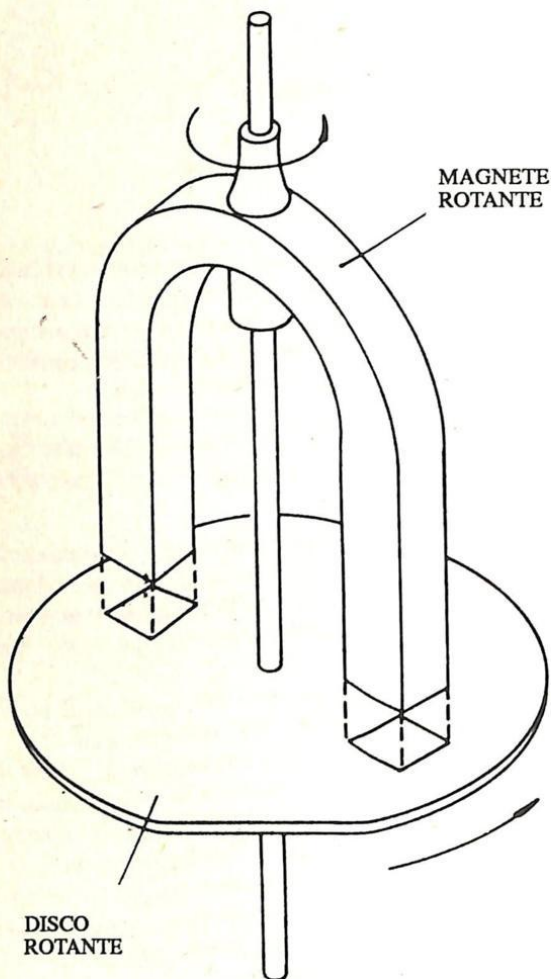



Fig. 1.- Esperimento di Ferraris, che servì da base per lo studio dei motori ad induzione.

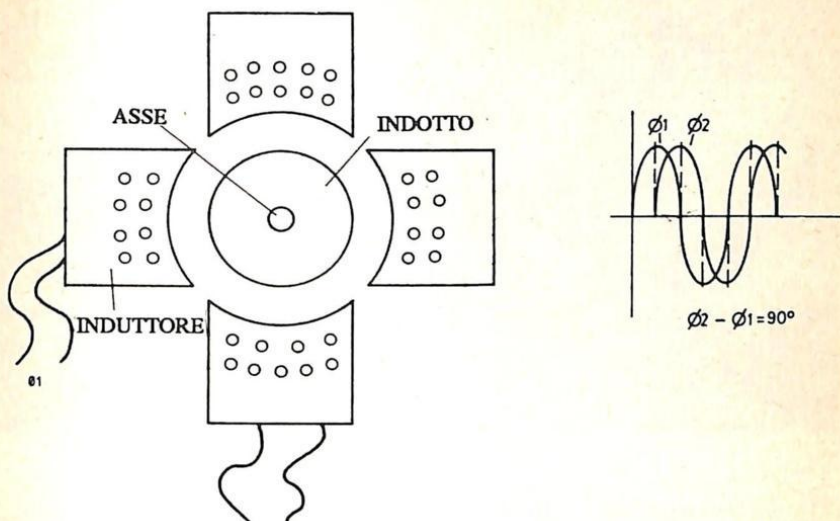



Fig. 2.- Ottenimento di un campo rotante mediante l'utilizzo di due bobine poste perpendicolarmente tra di loro, e alimentate da correnti sfasate di 90°.

locità di rotazione non sono uguali, o sincrone.

L'esperimento descritto non può essere direttamente convertito in un motore, poiché non c'è trasformazione di energia elettrica in energia meccanica; infatti, per far ruotare il disco, è necessario far ruotare la calamita, per cui si è semplicemente creato un accoppiamento elettromagnetico.

Il metodo utilizzato per ottenere un campo rotante senza che sia necessario ruotare la calamita, è quello di utilizzare due elettromagneti posti perpendicolarmente tra di loro, ai quali vengono applicate due correnti alternate di uguale valore e frequenza, sfasate tra di loro di 90°.

Utilizzando una corrente alternata sinusoidale, si otterrà un campo che varia con la stessa legge, che, combinandosi con l'altro simile, ma di valore differente a causa della differenza di fase e con orientazione diversa dovuta alla differente posizione relativa, produce l'effetto desiderato.

Questo insieme delle due bobine costituisce l'induttore, o *statore*, e provoca sul *rotore*, in cui il disco è stato sostituito da un altro elemento, un movimento rotatorio, la cui velocità di rotazione vale N = f (g.p.s.), dove f è la frequenza della corrente alternata applicata.

Fig. 3.- Dettaglio della cavità di statore in cui ha sede il rotore; è un motore monofase.

Fig. 4.- Rotore di un motore ad induzione, formato da dischi contigui cortocircuitati sui bordi.

Rotore di un motore ad induzione

Il rotore di un motore ad induzione viene costruito in base a due differenti sistemi, anche se il principio di funzionamento è lo stesso per entrambi, che consistono nell' avere a disposizione un sistema di spire, avvolte o no, su di un nucleo di materiale ferromagnetico.

Le spire servono per la circolazione della corrente indotta che forma il campo magnetico opposto a quello creato dallo statore.

Il primo tipo di rotore che viene descritto, è costituito da un cilindro formato da dischi paralleli contigui, isolati fra di loro, e provvisti di scanalature sulla superficie esterna, in cui trovano posto le spire o gli avvolgimenti, chiusi su se stessi.

Il secondo tipo di rotore è costituito da due corone conduttrici unite tra di loro da barrette, anch'esse conduttrici, che formano una specie di gabbietta per animali, da cui la sua denominazione di rotore a *gabbia di scoiattolo*; questo sistema è uno dei più utilizzati nella pratica, soprattutto per applicazioni di

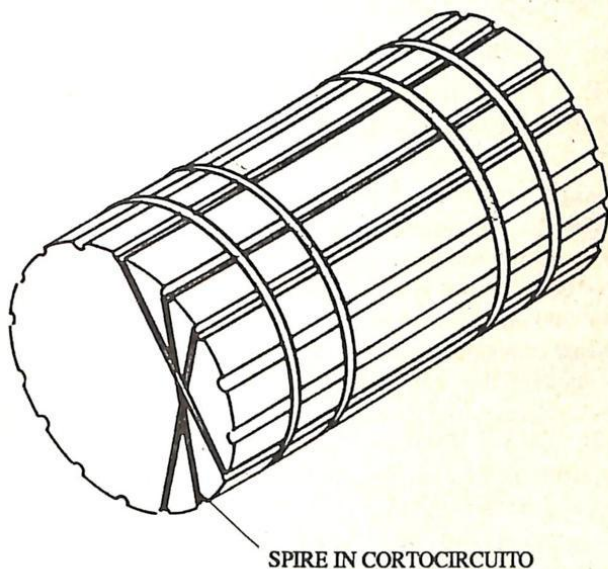



Fig. 5.- Rotore costituito da vari dischi contigui, con le spire situate nelle scanalature esterne.

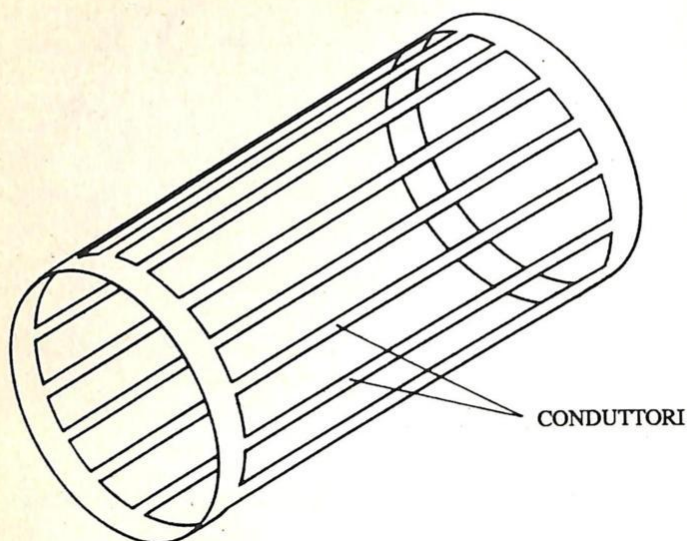



Fig. 6.- Rotore a gabbia di scoiattolo, formato da barre conduttrici cortocircuitate agli estremi da corone.

piccola potenza.

Il principio di funzionamento descritto precedentemente, in cui lo statore generava un campo rotante, è applicabile solo nel caso si abbiano a disposizione le due correnti sfasate di 90^{0} citate in precedenza.

Questo fatto non avviene nella pratica comune, poiché i motori vengono normalmente collegati alla rete elettrica convenzionale che è monofase, per cui non si può ottenere il campo elettrico rotante.

Di conseguenza non si avrebbe l'avviamento; se però si applica una forza esterna che ponga in rotazione il rotore, si può osservare che, anche dopo aver eliminato questa forza esterna, il movimento rotatorio permane, e aumenta fino a raggiungere la velocità di regime.

Ciò è dovuto al fatto che il campo monofase applicato si scompone in due campi rotanti della stessa intensità ma di verso contrario, il cui effetto risultante si annulla; basta perciò produrre uno squilibrio tra di loro, perché uno si accentui e l'altro si attenui, dando origine ad un campo rotante risultante che è in grado di far ruotare l'indotto.

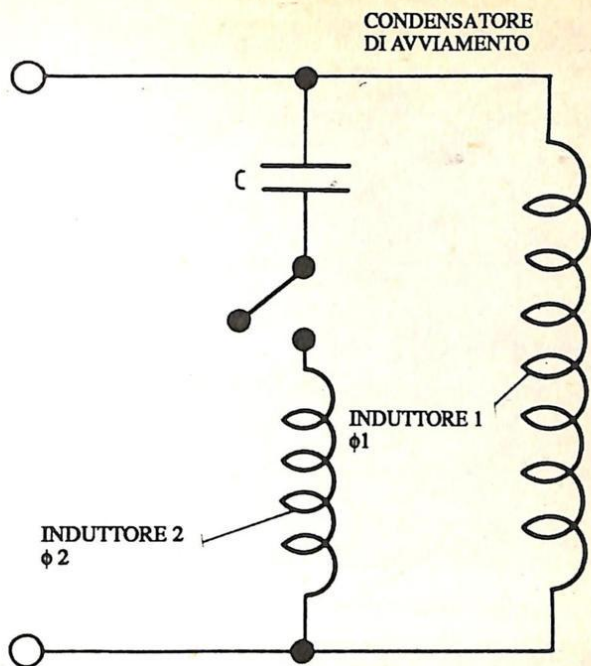



Fig. 7.- Schema elettrico di un circuito utilizzabile per l'avviamento di un motore ad induzione monofase, azionato dal condensatore C.

Avviamento

Per evitare il sistema meccanico di avviamento, si utilizza un secondo avvolgimento sullo statore, definito avvolgimento di avviamento, posto in modo che formi un angolo retto rispetto all'avvolgimento primario. Facendo circolare in questo avvolgimento una corrente sfasata di 90^{o} rispetto a quella che circola nell'avvolgimento principale, il motore si comporterà come se fosse bifase, e si produrrà un campo magnetico rotante che farà ruotare il rotore; in quel momento si può eliminare la corrente nell'avvolgimento secondario.

Il modo per ottenere la corrente di avviamento con la differenza di fase suddetta, è quello di utilizzare una reattanza (bobina o condensatore) in serie con l'avvolgimento ausiliario, che produca una corrente che, anche se con uno sfasamento non precisamente di 90^{o} a causa delle componenti resistive pro-

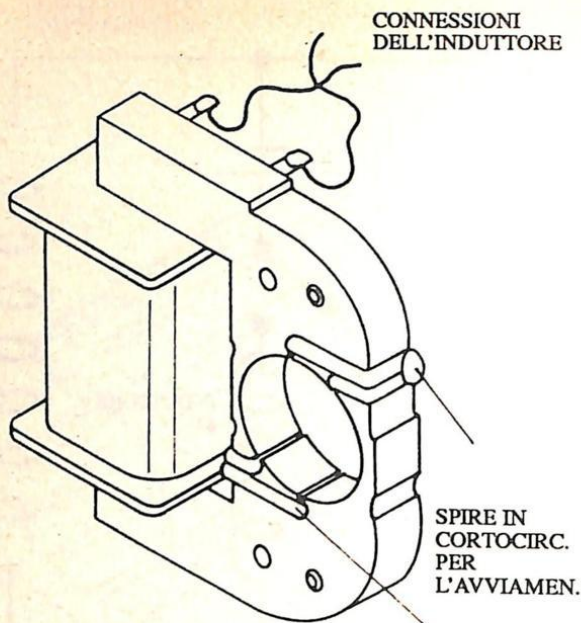



Fig. 8.- Statore di un motore asincrono monofase, dotato di spire in cortocircuito per l'avviamento.

prie del componente, sia sufficiente per raggiungere lo scopo desiderato.

Un altro sistema utilizzato per l'avviamento dei motori asincroni, è quello di utilizzare due gruppi di spire chiuse in cortocircuito e poste sullo statore in prossimità del rotore.

In questo modo, si crea uno squilibrio di fase del campo magnetico che agisce sull'indotto, sufficiente per l'avviamento ed il mantenimento della rotazione.

Coppia e velocità

Le caratteristiche di velocità e coppia in un motore asincrono sono sufficientemente relazionate, e normalmente si rappresentano tramite una curva dalla quale si può ricavare il punto di funzionamento più adeguato.

La logica di questo, sta nel fatto che se si avvia il motore in assenza di carico, la velocità del rotore tende a essere uguale a quella del campo rotante

Fig. 9.- Motore a induzione il cui rotore è esterno allo statore.

Fig. 10.- Dettaglio dello statore e del rotore, del tipo a gabbia di scoiattolo, del motore precedente.

dello statore, poiché è sufficiente che ci sia una piccola differenza tra di loro perché si generino nell'indotto le correnti necessarie per mantenerlo in rotazione, per cui la coppia applicata sarà molto bassa, e dovrà vincere solamente le resistenze di attrito dell'asse.

Nel momento in cui viene applicato un carico meccanico sull'asse del rotore, sarà necessario che la coppia aumenti e diventi tale da poter porre in movimento anche il suddetto carico.

Come conseguenza, la velocità diminuisce, poiché aumentano le correnti indotte nel rotore che sono proporzionali alla differenza di velocità tra i campi dell'induttore e dell'indotto. Questa differenza di velocità viene definita *scorrimento.*

A causa delle caratteristiche che presenta il motore nel momento dell'avviamento, la coppia ottenuta in questa circostanza non è molto elevata, ed è sempre inferiore alla coppia massima che il motore è in grado di sviluppare, per cui nei dispositivi utilizzati per l'avviamento si tiene conto di questo fatto, con l'obiettivo che il motore superi sempre questa fase iniziale.

Un altro parametro che deve essere considerato, soprattutto nei motori di potenza media o elevata, è il *fattore di potenza*, che esprime il valore della potenza reattiva del motore durante il suo funzionamento.

Viene espresso dal rapporto tra la potenza reale assorbita dal motore, espressa in watt, e la potenza apparente ricavata dal prodotto tra la tensione applicata e la corrente assorbita.

La sigla con cui si identifica il fattore di potenza è il cos ϕ.

fattore di potenza = cos ϕ = Potenza reale / Potenza apparente.

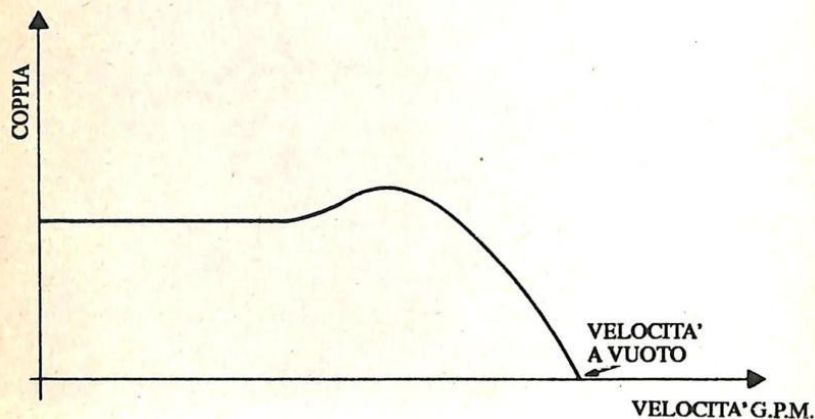



Fig. 11.- Curva caratteristica coppia-velocità in un motore a induzione.

CAPITOLO 7

MOTORI SINCRONI

I motori *sincroni*, costituiscono l'altro gruppo di motori funzionanti in corrente alternata. La loro caratteristica più saliente è costituita dal sincronismo, cioè dalla velocità di rotazione che si mantiene costante e uniforme, ed è proporzionale alla frequenza della corrente di alimentazione.

Normalmente, questo tipo di motori è costituito da un induttore mobile, o rotore, e da un indotto fisso, o statore, al contrario dei modelli visti finora, in cui la parte mobile corrispondeva quasi sempre all'indotto.

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento è abbastanza semplice, ed è basato sugli effetti combinati del campo magnetico costante dell'induttore, costituito da un elettromagnete attraversato da corrente continua o da un magnete permanente, e dell'indotto, che contiene una serie di bobine a cui viene applicata una corrente alternata.

Supponiamo di avere a disposizione una struttura elementare, come quella rappresentata in Fig. 1, costituita da due coppie di avvolgimenti su di un nucleo magnetico, rappresentati da 1 e 2, e da un magnete permanente situato su di un asse rotante posto nel centro geometrico degli elementi detti in precedenza, in una direzione perpendicolare al piano formato da questi ultimi.

Applicando una corrente alternata alla coppia di bobine 1, si formerà in queste un campo magnetico che varierà in intensità e verso con l'alternarsi della corrente.

Ad un determinato istante, il campo sarà massimo su ambedue, e si for-

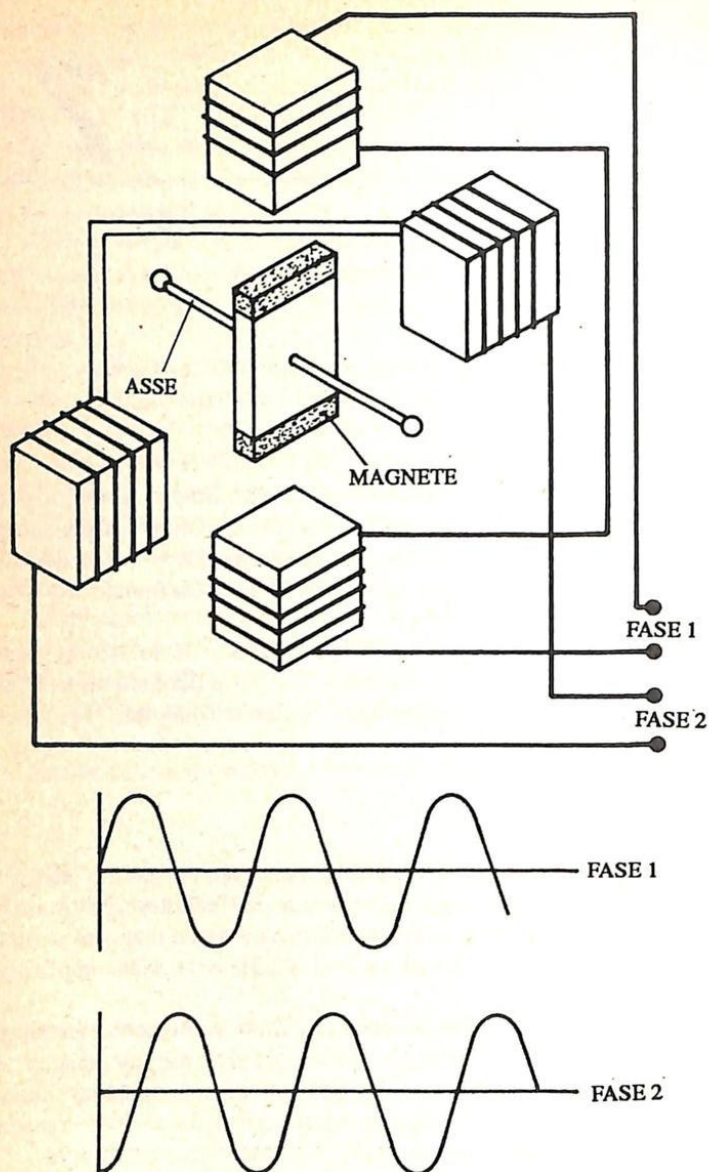



Fig. 1.- Struttura elementare di un motore sincrono, nella quale viene rappresentata una calamita, che costituisce lo statore, nel centro geometrico degli avvolgimenti di indotto.

meranno un polo nord sulla parte superiore delle bobine inferiore e superiore, e un polo sud sulla parte inferiore delle stesse; in questo momento, il magnete permanente verrà fortemente attratto da queste, e si orienterà in senso verticale.

Se contemporaneamente viene applicata una seconda corrente alternata alla coppia di bobine 2, con una fase ritardata di 90° rispetto alla precedente, nell'istante considerato il campo sarà nullo, poiché la corrente passerà per il valore zero e non eserciterà nessuna influenza.

Successivamente, comincierà a crescere e decrescere quello prodotto dagli avvolgimenti 1, e il magnete ruoterà portandosi in posizione orizzontale, allineato con gli avvolgimenti 2; il processo continua al diminuire del secondo campo ed al crescere del primo, però in senso contrario a quello iniziale, poiché il verso della corrente è ora negativo, e si invertiranno le polarità dei poli magnetici definiti precedentemente.

Questo, costringe il magnete a portarsi nuovamente in posizione verticale, ma con il polo nord di sotto ed il polo sud di sopra.

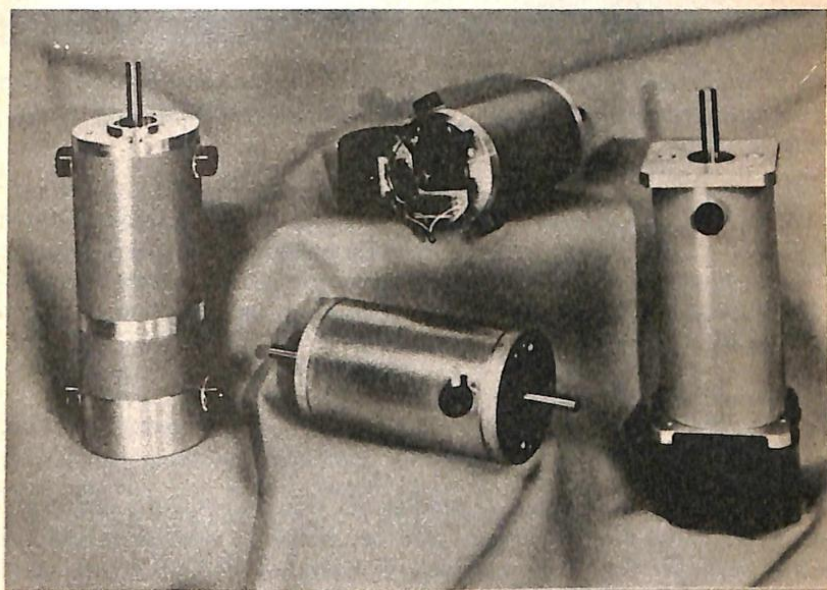



Fig. 2.- Modello di motore sincrono, il cui induttore è costituito da un magnete permanente di forma cilindrica. Sono rappresentati, inoltre, gli avvolgimenti di indotto.

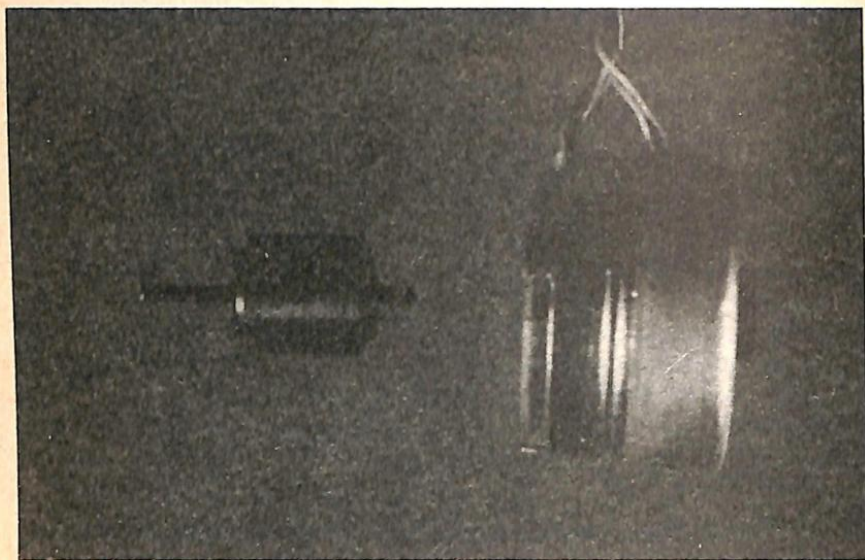



Fig. 3.- Altro modello di motore sincrono, il cui induttore è costituito da un magnete permanente di forma cilindrica. Sono rappresentati, inoltre, gli avvolgimenti di indotto.

Il passo successivo è dovuto agli avvolgimenti 2, che hanno invertito il loro campo, attraendo nuovamente il magnete e mantenendolo in rotazione.

Questa sequenza ripetitiva porterà come risultato, ad una trasformazione dell'energia elettrica in una energia meccanica di rotazione, che è la caratteristica principale di qualunque motore.

Velocità

Nel nostro caso, il magnete permanente, o rotore, eseguirà una rivoluzione ad ogni ciclo completo della corrente, per cui la velocità di rotazione coinciderà con la frequenza; se questa è di 50 Hz, farà 50 cicli completi al secondo, e come conseguenza il rotore eseguirà 50 rotazioni al secondo o, detto in altro modo, avrà una velocità di rotazione di 50 giri al secondo (50 g.p.s.).

Se al posto di un magnete permanente come rotore, se ne utilizzano due, posti ad angolo retto e uniti solidalmente allo stesso asse, e al posto di due bo-

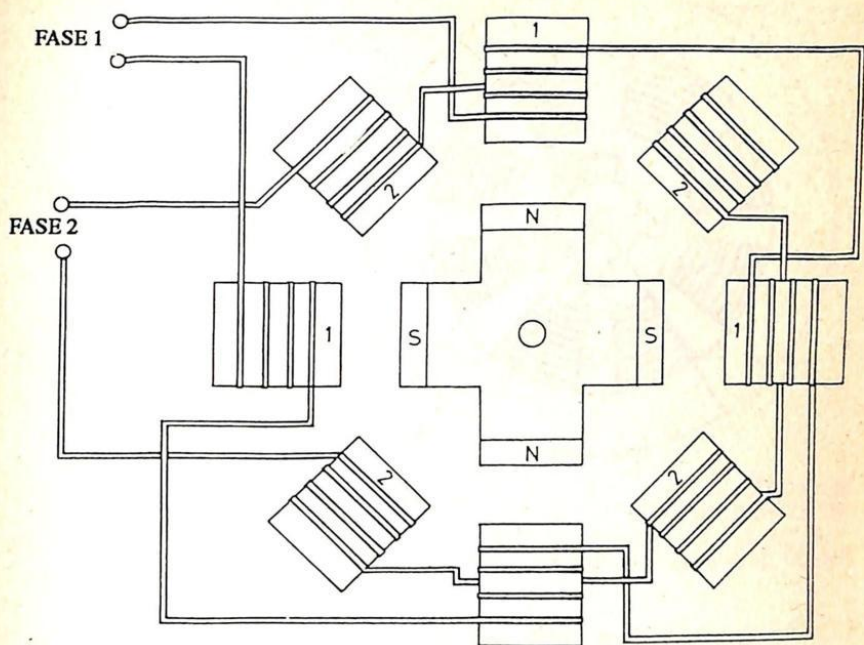



Fig. 4.- Partendo dalla struttura precedente, si può costruire quest'altra, nella quale l'induttore è composto da due paia di poli, ed in cui la velocità si riduce alla metà.

bine con correnti sfasate se ne usano quattro, l'effetto risultante sarà lo stesso, ma con una velocità che risulterà dimezzata rispetto a prima.

Pertanto, si può definire la velocità di rotazione di un motore sincrono tramite la relazione $N = f/P$, dove N rappresenta la suddetta velocità per secondo, f è la frequenza della corrente alternata, e P è il numero di coppie di poli dell'induttore; nel caso precedente perciò, poiché il magnete ha due coppie di poli, la velocità risultante sarà di 25 g.p.s.

Induttore e indotto

Alcuni modelli di motori sincroni, contengono l'induttore all'interno del-

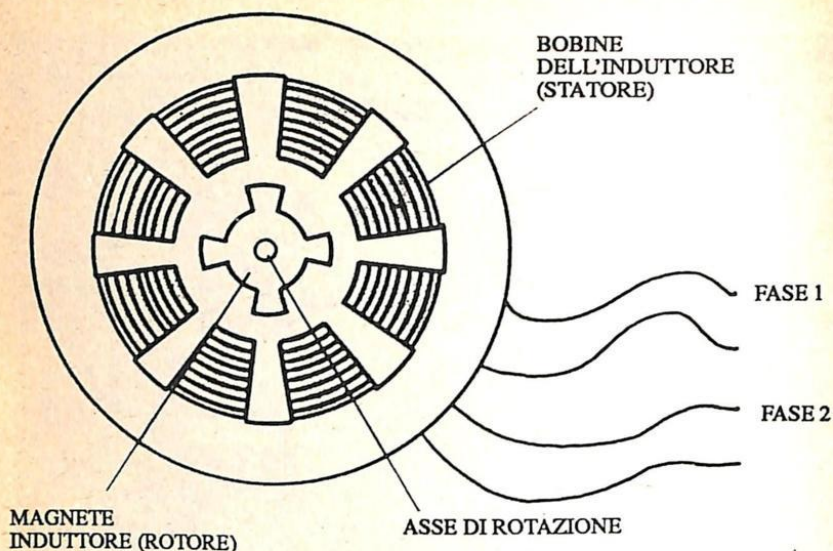



Fig. 5.- Sezione schematica di un motore sincrono con due coppie di poli.

l'indotto, per cui la parte mobile sarà quella esterna, e il loro principio di funzionamento è simile a quello descritto anteriormente.

In alcuni casi, e per alcuni tipi di motori, viene sostituito il magnete permanente dello statore con un elettromagnete; in questo caso, è necessario applicare agli avvolgimenti una corrente continua di eccitazione, con lo scopo di poter creare tutte le coppie di poli magnetici necessari.

Inoltre, poiché questi elettromagneti costituiscono il rotore e sono pertanto mobili, è necessario che siano dotati di un dispositivo in grado di fornire i contatti per il passaggio della suddetta corrente durante la rotazione, come nel caso dei motori a corrente continua.

Per questo si utilizzano due anelli *collettori* su cui appoggiano delle spazzole, in modo che il polo positivo corrisponda sempre ad un anello, ed il polo negativo all'altro.

Per creare le due fasi necessarie all'avviamento e al funzionamento del motore, si utilizza un condensatore posto in serie ad uno dei due gruppi di avvolgimenti. In questo modo la corrente sarà ritardata di 90° circa, e fornirà alle bobine le condizioni richieste.

Se, invece di collegare il condensatore all'avvolgimento detto in precedenza si collega all'altro gruppo, l'effetto risultante sarà quello di invertire il verso di rotazione, mantenendo inalterate le rimanenti caratteristiche.

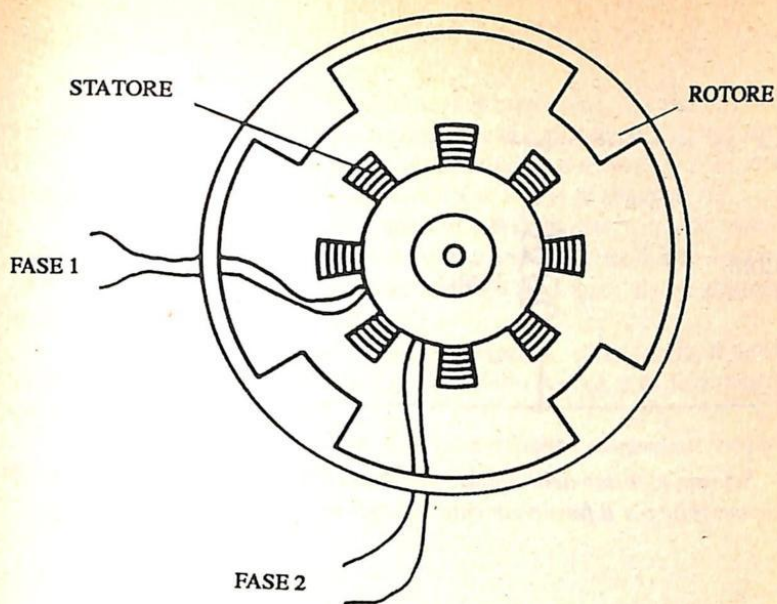



Fig. 6.- Alcuni modelli di motori sincroni, contengono l'indotto all'interno dell'induttore, come mostrato in figura.

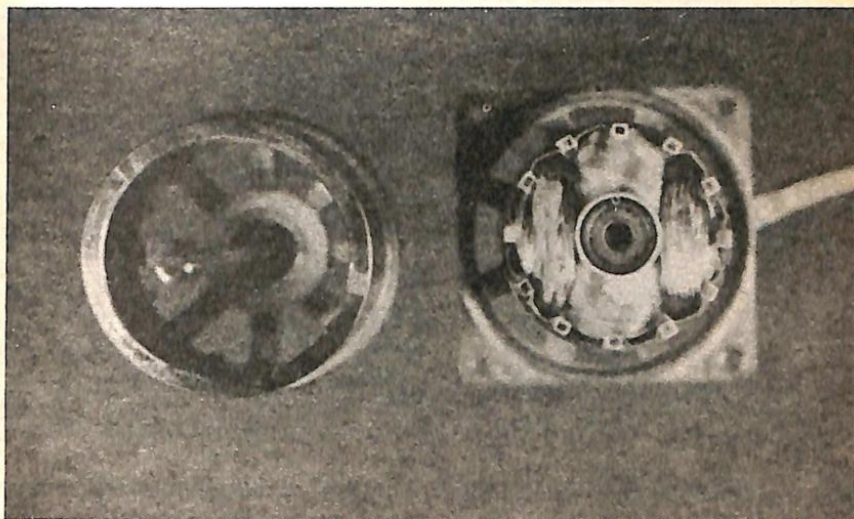



Fig. 7.- Motore a corrente alternata.

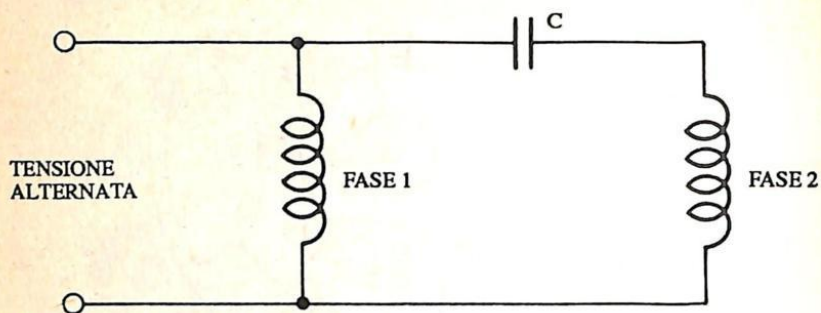



Fig. 8.- Schema elettrico delle connessioni necessarie per creare lo sfasamento indispensabile per il funzionamento del motore.

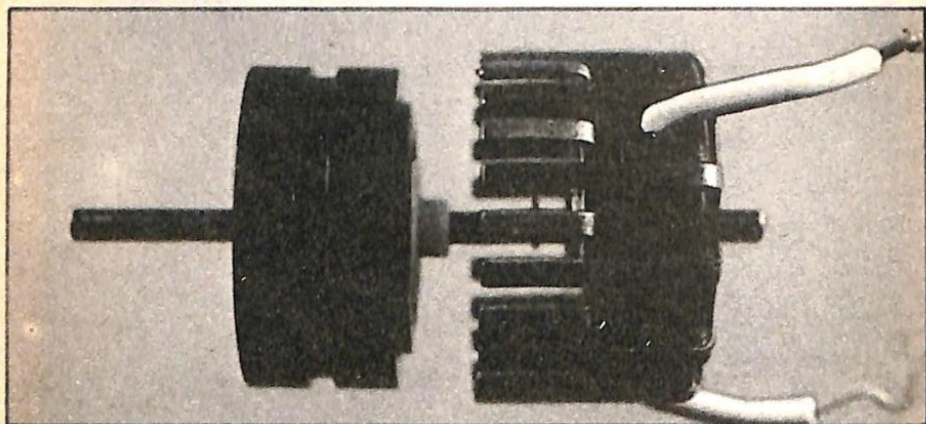



Fig. 9.- Dettaglio dell'induttore e dell'indotto di un altro modello di motore sincrono di grandi dimensioni. Viene utilizzato un magnete per il rotore, o induttore.

Applicazioni

Le principali proprietà dei motori sincroni sono, in sostanza, la loro velocità rigorosamente costante, entro i limiti di carico imposti dalla loro coppia. Ciò permette un gran numero di applicazioni, tra le quali si può ricordare il trascinamento dei nastri magnetici nei registratori di alta qualità.

Altra interessante caratteristica di questi motori, solo nel caso in cui il rotore sia costituito da un magnete permanente, è quella di non aver necessità per il movimento di alcun contatto elettrico strisciante, tipo le spazzole o simili, che ne prolungano la vita utile.

Nel caso in cui il carico applicato superi il valore limite, il motore non potrà seguire l'alternanza della corrente dello statore, e si disaccoppierà immobilizzando rapidamente il rotore.

In questo caso la corrente di indotto potrebbe aumentare, raggiungendo valori di intensità pericolosi per gli avvolgimenti.

Numero di poli	***Frequenza (Hz)***	
	50	***60***
2	3.000	3.600
4	1.500	1.800
6	1.000	1.200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

Tavola delle velocità in g.p.m. di un motore sincrono, in funzione del numero di poli e della frequenza.

CAPITOLO 8

MOTORI UNIVERSALI

Esiste un tipo di motore che può lavorare in corrente alternata, e che viene utilizzato in numerevoli applicazioni, grazie alla sua semplicità di funzionamento e al suo basso prezzo: si tratta del *motore universale*, o a collettore. Inoltre, presenta la particolarità di poter lavorare anche con correnti continue, anche se in questa configurazione non è molto utilizzato.

Struttura del motore universale

La sua struttura è molto simile a quella dei motori in corrente continua, con gli avvolgimenti di induttore e di indotto collegati in serie

Il funzionamento di un motore in corrente continua, come si ricorderà, consisteva nell'applicare una certa corrente ad un elettromagnete induttore, che creava un campo magnetico agente su di un rotore, formato da una bobina avvolta su di un cilindro di materiale magnetico accoppiato ad un asse meccanico.

Le connessioni dell'avvolgimento venivano realizzate tramite un anello collettore diviso in due parti isolate tra di loro, a contatto con due spazzole collegate a loro volta al polo positivo e negativo dell'alimentazione. La corrente si invertiva due volte ad ogni giro, per mantenere la rotazione.

Se si collegano in serie le spazzole con l'avvolgimento dell'induttore, e ai capi si applica una tensione alternata, nel semiperiodo in cui questa tensione è positiva la corrente circolerà per entrambi gli avvolgimenti, producendo le condizioni necessarie alla rotazione.

Durante il semiperiodo negativo, la corrente cambierà il suo verso di cir-

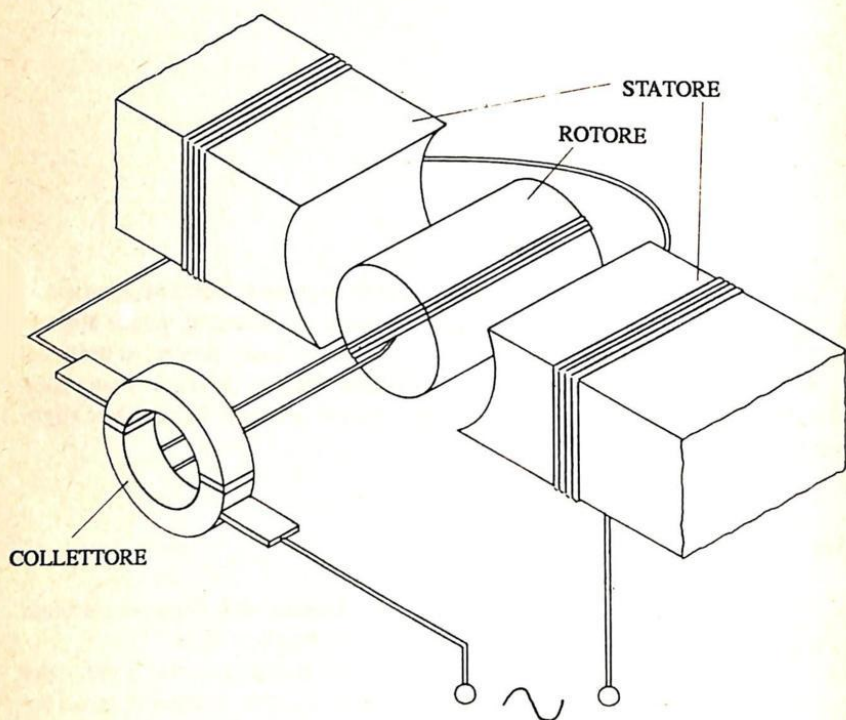



Fig. 1.- Schema delle connessioni di un motore universale, con l'induttore e l'indotto posti in serie all'alimentazione.

colazione, però in ambedue gli avvolgimenti contemporaneamente, per cui non varieranno le condizioni relative tra di loro, e il movimento del rotore non verrà alterato.

Questo effetto è logico, poiché se uno stesso motore alimentato in continua si ferma, e si inverte la polarità delle spazzole, alla ripartenza si osserverà che il verso di rotazione è lo stesso di prima, e non si verificheranno variazioni a causa del cambio effettuato.

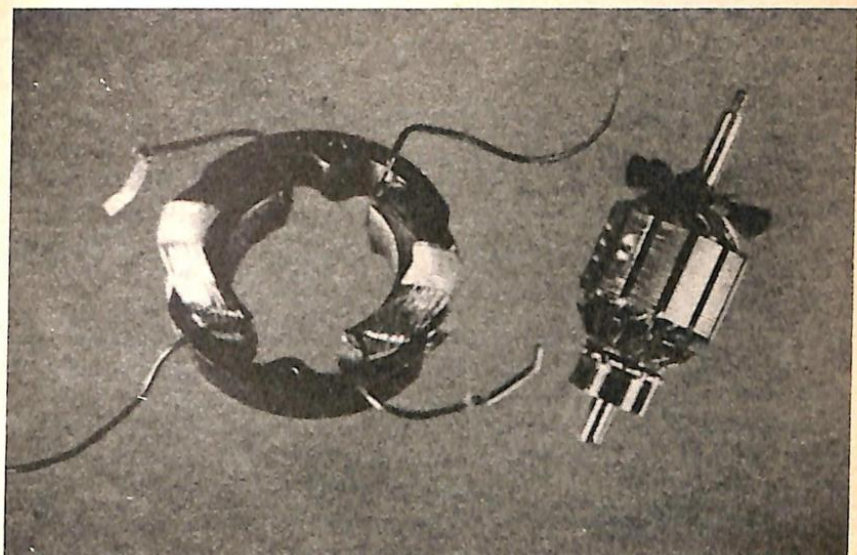



Fig. 2.- Motore universale in cui si può osservare alla sinistra lo statore, e alla destra il rotore. Il collettore è posto nella zona superiore di quest'ultimo.

Variazioni costruttive

In pratica, è necessario tener conto di alcuni fattori che implicano certe variazioni della struttura, che permettono di ottenere i risultati previsti.

In primo luogo, nel nucleo massiccio utilizzato con i motori in continua si producono delle perdite molto elevate, quando sono influenzati da un campo magnetico alternato, a causa delle correnti indotte nello stesso, o *correnti di Foucault*, il che rende necessario costruirlo con delle lamelle sottili separate da piccoli strati di carta o vernice.

Il secondo inconveniente che si presenta, è la grande perdita di energia che si ha nel ferro del nucleo, per effetto dell'*isteresi magnetica*, che rende necessaria una diminuzione dei volumi dello stesso, sia per l'induttore che per l'indotto.

Questo tipo di motori viene utilizzato nella maggior parte delle apparecchiature domestiche: aspirapolvere, ventilatori, macchine da cucire, affettatrici, fon, ecc.

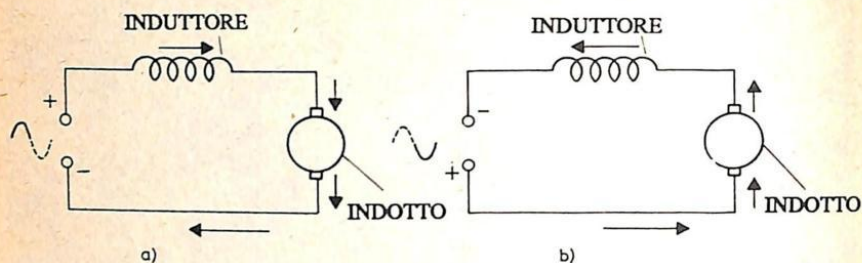



Fig. 3.- Circolazione delle correnti in un motore universale alimentato in alternata: a) durante il semiciclo positivo; b) durante il semiciclo negativo. In entrambi i casi il verso di rotazione rimane lo stesso.

CAPITOLO 9

MOTORI PASSO-PASSO

I motori passo-passo, chiudono la descrizione dedicata a questo ampio insieme di dispositivi in grado di trasformare l'energia elettrica in energia meccanica.

Questo tipo di motori, anche se di concezione abbastanza antica, ha avuto uno sviluppo solamente nel momento in cui la tecnologia dei semiconduttori ha permesso la costruzione di circuiti di attivazione e di controllo sufficientemente rapidi e adeguati.

In definitiva, le applicazioni fondamentali di questo tipo di motori, sono quelle in cui è richiesto un sistema di posizionamento sicuro ed affidabile, senza bisogno di ricorrere a sistemi più complessi, quali i servomeccanismi.

Inoltre, risolve con relativa semplicità altri problemi che nascono nei casi in cui si ha una esigenza di tutta la velocità di azionamento in determinati movimenti discontinui, che richiederebbe dei complicati montaggi a base di motori ordinari associati a sistemi di frenatura di grande sicurezza, di problematica esecuzione pratica.

Logicamente, esistono numerosi tipi di motori passo-passo che servono a coprire la vasta gamma di applicazioni a cui sono destinati, sia per il modo di funzionare, che per la logica derivata dalla grandezza e dalla potenza più adeguate per ciascun caso concreto.

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento è basato su di uno statore costituito da vari avvolgimenti indipendenti, avvolti su di un materiale ferromagnetico, e da un rotore che può ruotare liberamente all'interno dello statore.

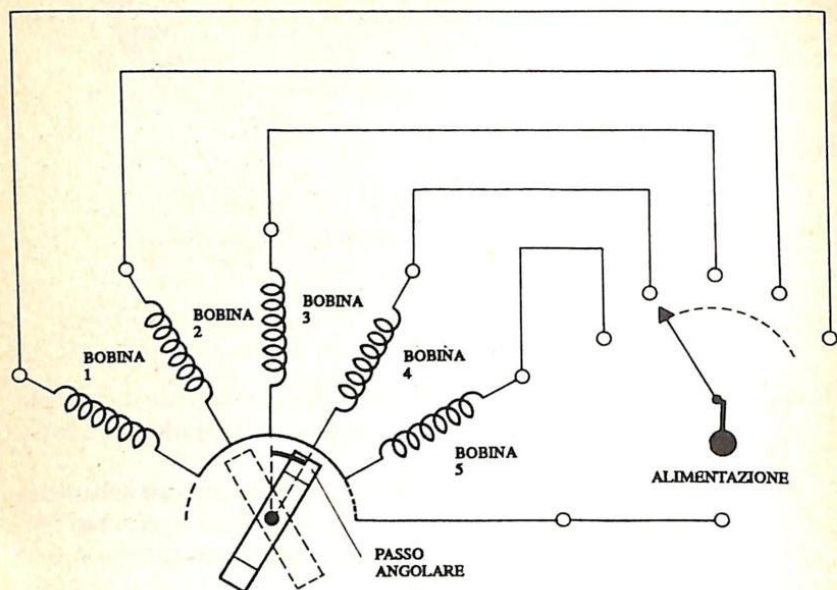



Fig. 1.- Principio di funzionamento di un motore passo-passo. Facendo circolare degli impulsi di corrente nelle bobine, il rotore si sposterà in modo discontinuo secondo vari passi angolari.

Questi differenti avvolgimenti sono alimentati uno dopo l'altro, e causano uno spostamento angolare che viene definito *passo angolare*, che costituisce la principale caratteristica del motore. Il verso di rotazione viene definito dalla sequenza con cui vengono eccitati i vari avvolgimenti.

Tipi di motori passo-passo

Esistono principalmente due tipi di motori passo-passo. Il primo di questi funziona grazie all'effetto di reazione che si produce tra un campo elettromagnetico e un magnete permanente: per questo motivo viene definito *motore passo-passo con magnete permanente*.

Il secondo funziona mediante l'azione di un campo elettromagnetico su di un rotore di ferro dolce che, come si sa, presenta un magnetismo residuo

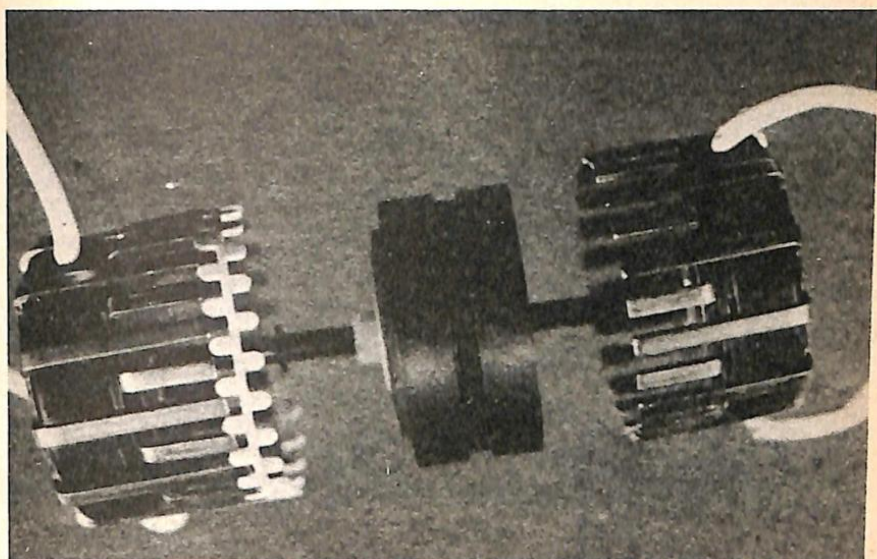



Fig. 2.- Motore passo-passo con magnete permanente, il cui statore è composto da due avvolgimenti situati su entrambi gli estremi dell'immagine.

molto debole. Questo tipo di motore viene definito *motore passo-passo a riluttanza variabile*.

In entrambi i casi, è necessario un circuito o dispositivo esterno che fornisca l'alimentazione sequenzialmente a tutti gli avvolgimenti dello statore, in modo che ne rimanga eccitato solo uno in qualsiasi momento.

Di conseguenza, il sistema di alimentazione non sarà costituito da una corrente alternata o continua, come nei tipi trattati precedentemente, ma sarà costituito da *impulsi* di tensione e corrente.

Supponendo di avere a disposizione una sequenza costante e uniforme di impulsi di eccitazione, che vengono inviati agli avvolgimenti con una frequenza *f*, e che il motore abbia un numero *n* di avvolgimenti, si otterrà una velocità di rotazione di V = f/n giri al secondo (g.p.s.), considerando naturalmente che ogni rivoluzione eseguita dal rotore sarà composta da tanti *salti* quanti saranno gli avvolgimenti dello statore, quantità definita nel nostro esempio con *n*.

Lo spostamento angolare che si ottiene ad ogni passo si calcola dividendo i 360° corrispondenti ad una rivoluzione completa per il numero di avvol-

MAGNETE
PERMANENTE
N
S
CIRCUITO DI
COMMUTAZIONE
ALIMENTAZIONE

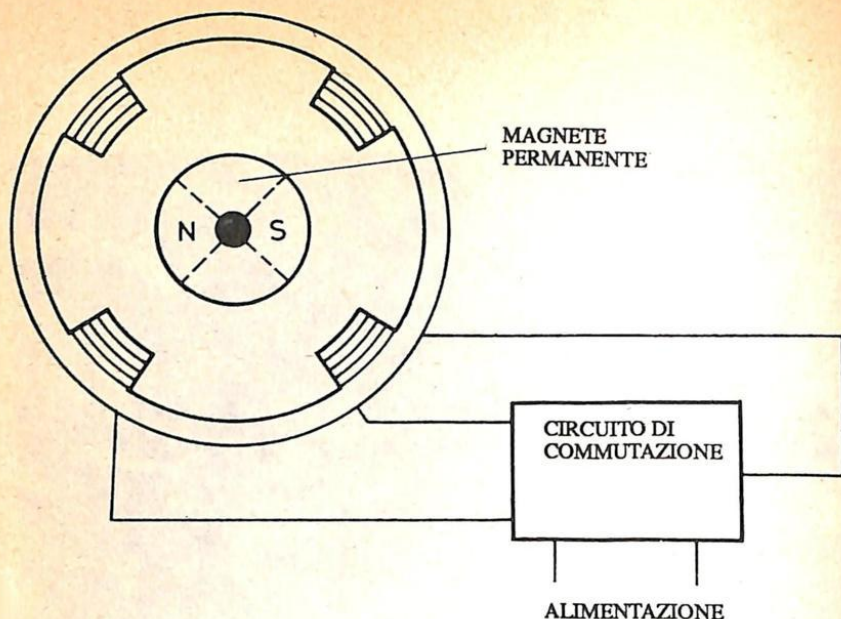



Fig. 3.- Schema semplificato di un motore passo-passo con magnete permanente, composto da due avvolgimenti, e con un passo angolare di 90^o.

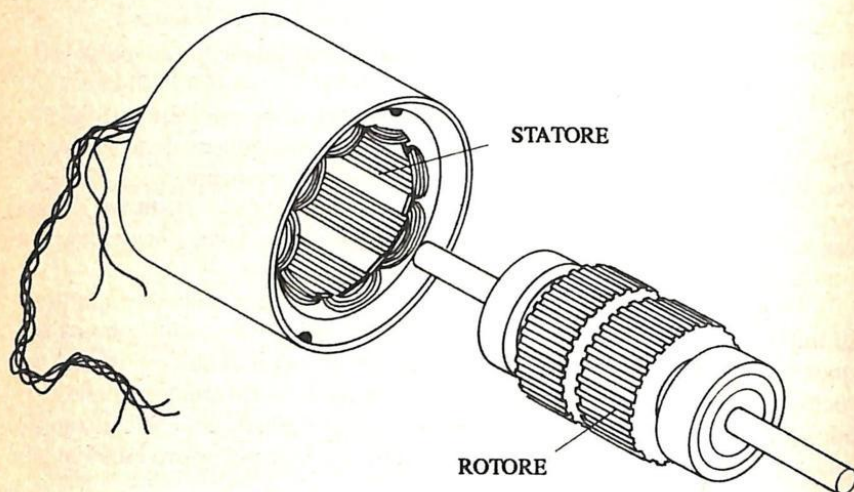



Fig. 4.- Motore passo-passo a riluttanza variabile. Ogni dente del rotore produce un avanzamento di un passo angolare.

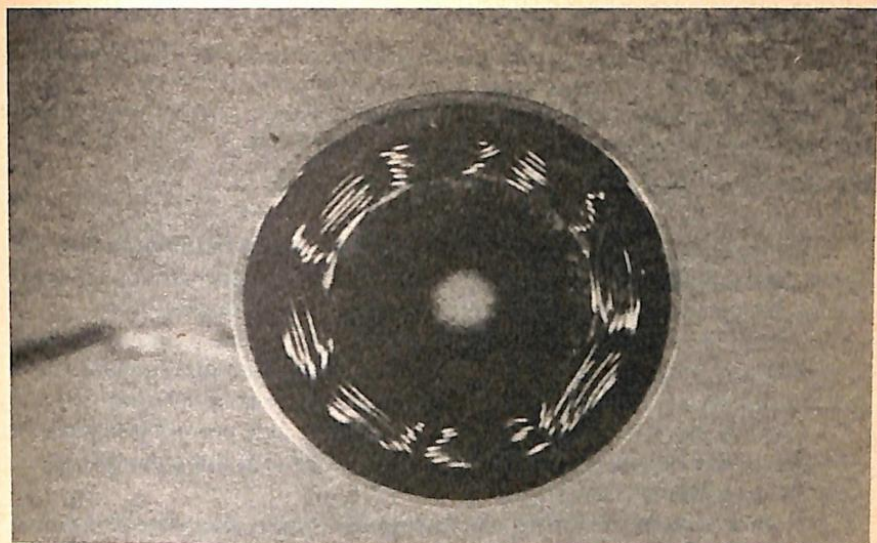



Fig. 5.- Dettaglio dello statore di un motore passo-passo a riluttanza variabile. E' costituito da quattro bobine di eccitazione, e il passo angolare è di 1,8 gradi.

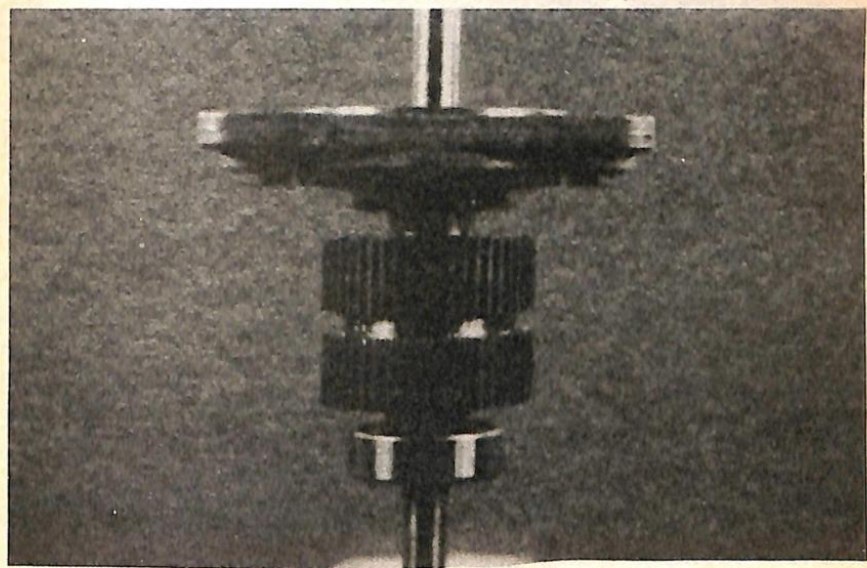



Fig. 6.- Dettaglio del rotore di un motore passo- passo a riluttanza variabile.

gimenti *n*, vale a dire che D = 360/n.

Verranno di seguito analizzati separatamente, i modelli definiti in precedenza.

Motore passo-passo con magnete permanente

Il *motore passo-passo con magnete permanente* è costituito da uno statore di forma cilindrica, con un certo numero di avvolgimenti alimentati in sequenza che creano un campo magnetico rotante in modo discontinuo.

Il rotore, concentrico allo statore e posto su di un asse, contiene un magnete fortemente magnetizzato che tende, in ogni istante, ad allinearsi con il campo magnetico creato dall'avvolgimento statorico corrispondente.

Come si può osservare, il suo funzionamento non potrebbe essere più semplice, poiché è basato sulle forze di attrazione che si sviluppano tra un magnete permanente e uno temporaneo.

Normalmente, e a differenza dei motori sincroni, il magnete del rotore è

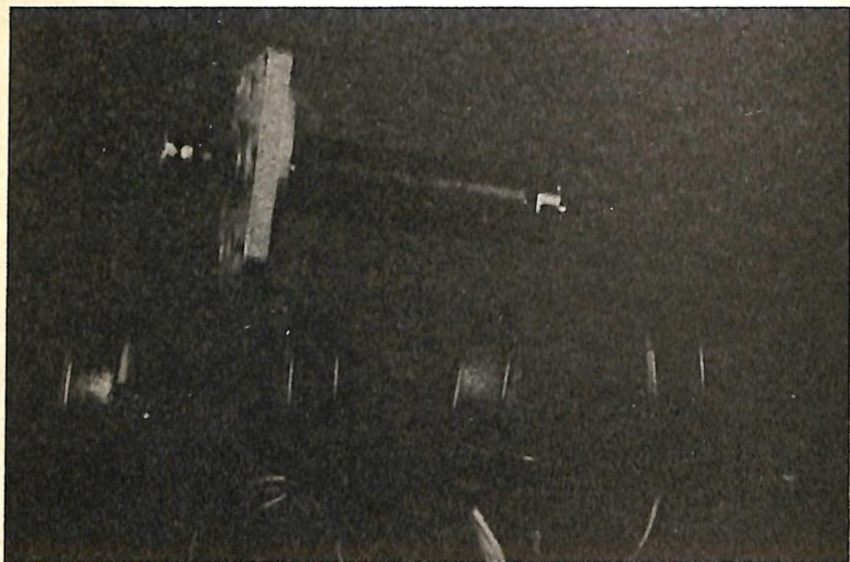



Fig. 7.- Insieme di tre motori di entrambi i tipi. Si possono notare l'aspetto esterno e compararne le grandezze.

bipolare, e i poli nord e sud sono situati agli estremi diametrali opposti del cilindro del rotore.

Il numero di avvolgimenti che compongono lo statore è normalmente due o quattro, con i quali si ottengono quattro *passi* per ogni giro, e lo spostamento angolare è di 90°. La frequenza di lavoro utilizzata è solitamente bas-

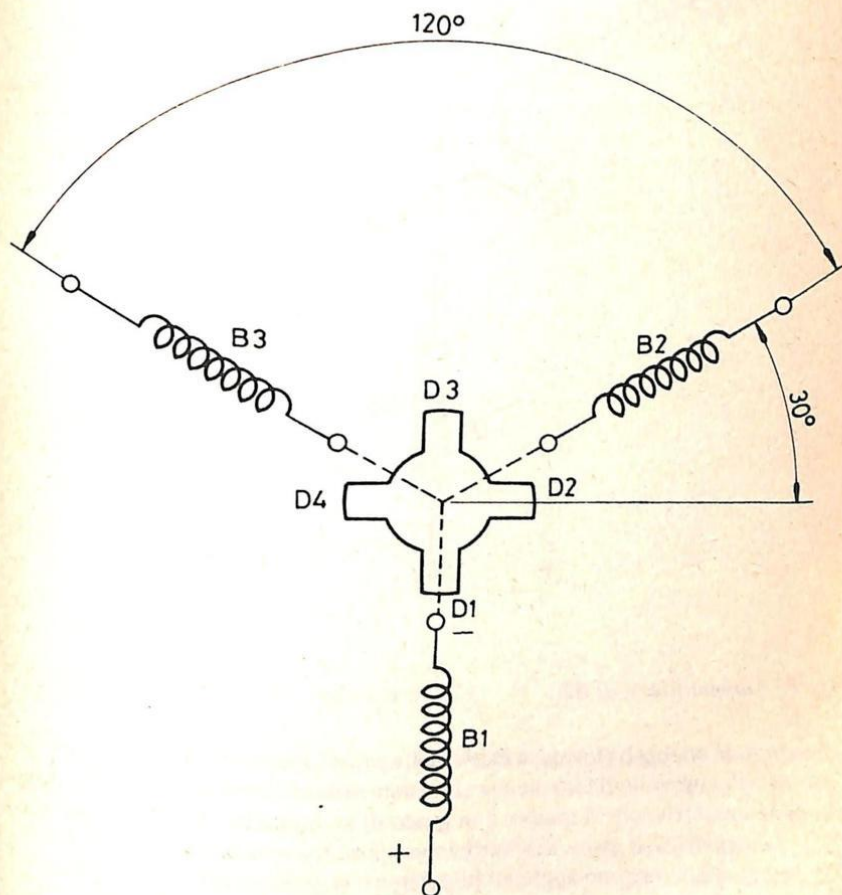



Fig. 8.- Sequenza di funzionamento di un motore a riluttanza variabile di quattro denti: la corrente circola in B1.

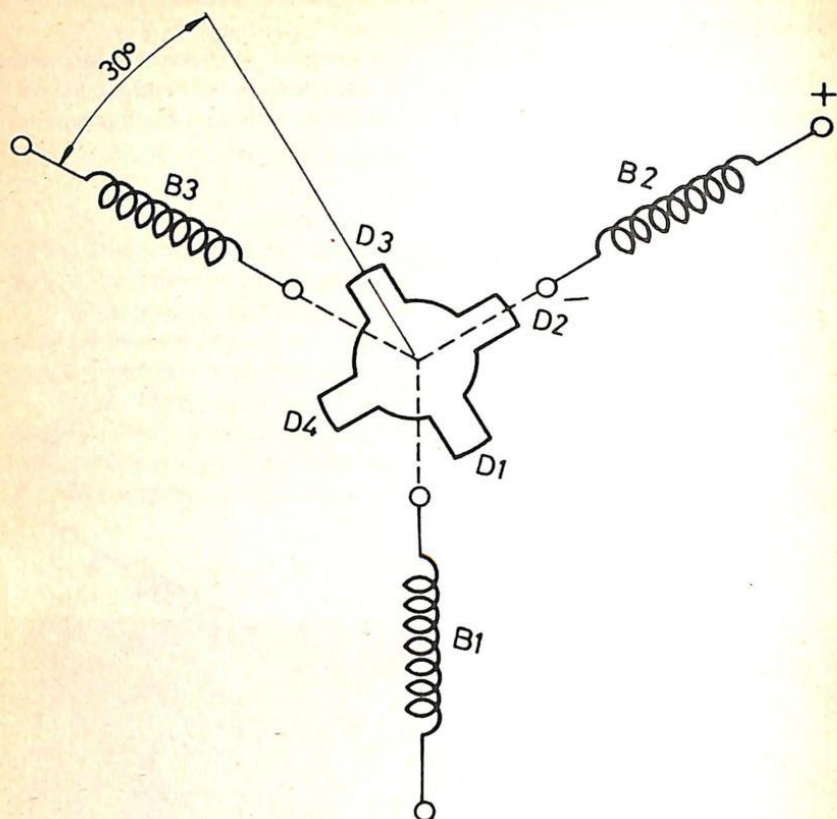



Fig. 9.- Alimentazione di B2.

sa, mentre la coppia è elevata, a causa della presenza del magnete.

Risulta opportuno fare alcune considerazioni relative alla massima coppia di azionamento che il motore è in grado di sviluppare.

Si supponga di avere a disposizione un motore costituito da due avvolgimenti ai quali vengono applicati impulsi con doppia polarità.

Quando l'alimentazione viene fornita all'avvolgimento 1, il magnete permanente si allineerà con il campo creato, in modo che solo nel momento in cui entrambi i campi si trovano esattamente in linea, la coppia si annulla.

Se al motore viene accoppiato qualche meccanismo esterno, questa si-

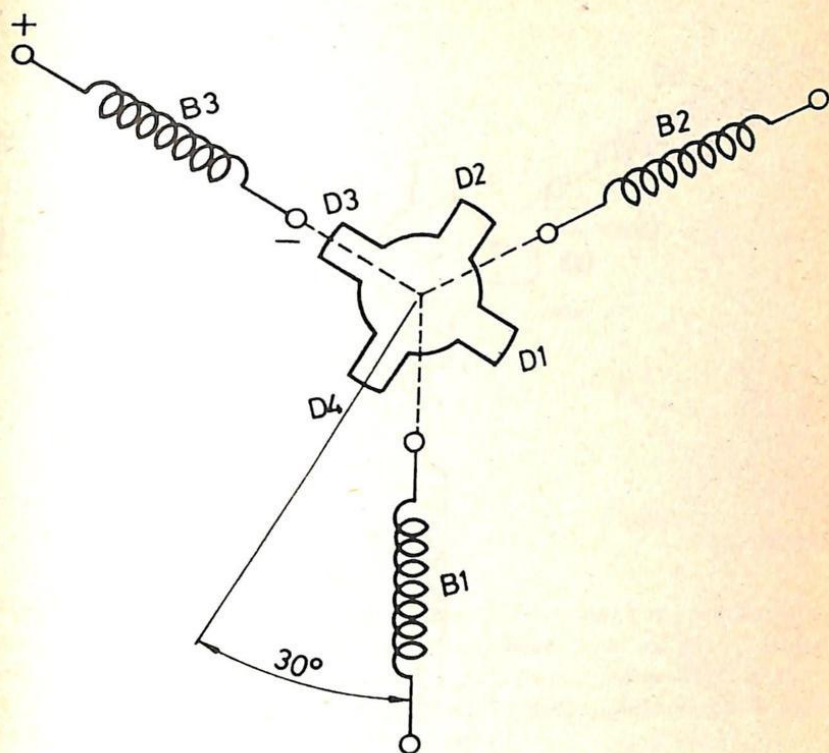



Fig. 10.- L'alimentazione è applicata a B3.

tuazione non potrà essere raggiunta, poiché la coppia sviluppata dovrà essere uguale a quella necessaria per muovere il carico, per cui si viene a formare un certo angolo tra i due campi.

Questa coppia sarà massima, quando l'angolo citato è di 90°, però, quando viene eccitato il secondo avvolgimento, il nuovo angolo formato sarà di 180°, e la coppia si annulla.

Pertanto, se ne deduce che un motore di questo tipo non dovrà mai essere caricato con sistemi che richiedano una coppia il cui angolo di mantenimento superi i 45°, anche se in pratica questo valore si riduce a circa 30°.

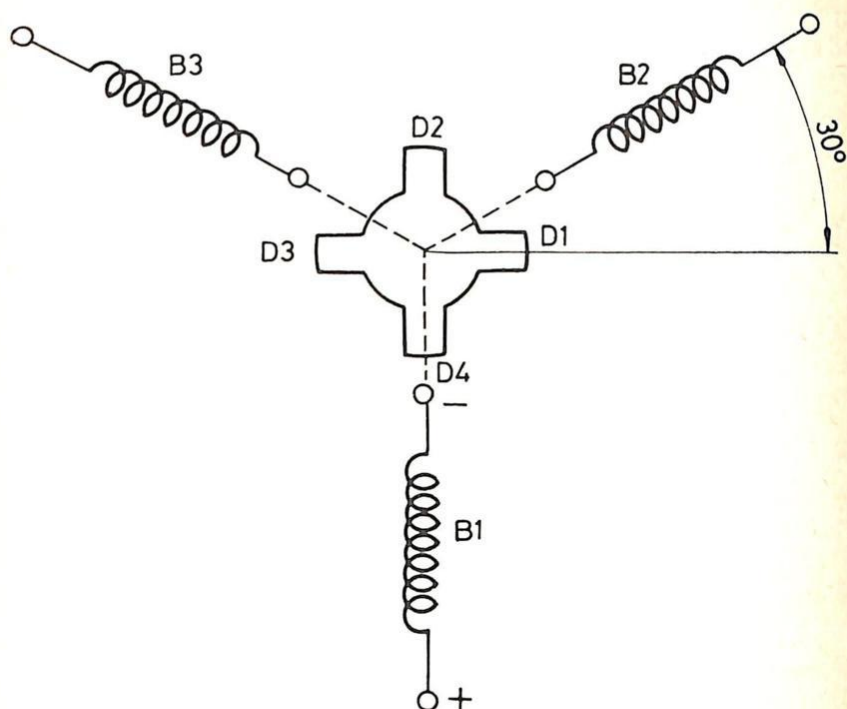



Fig. 11.- La corrente circola nuovamente in B1.

Motori a riluttanza variabile

i *motori passo-passo a riluttanza variabile* sono stati studiati per poter ottenere degli spostamenti angolari inferiori a quelli del tipo appena descritto, senza che per questo motivo si fosse dovuto aumentare considerevolmente il numero degli avvolgimenti.

Lo statore ha normalmente la classica forma cilindrica, con un totale di tre avvolgimenti disposti in modo da formare degli angoli di 120° a due a due.

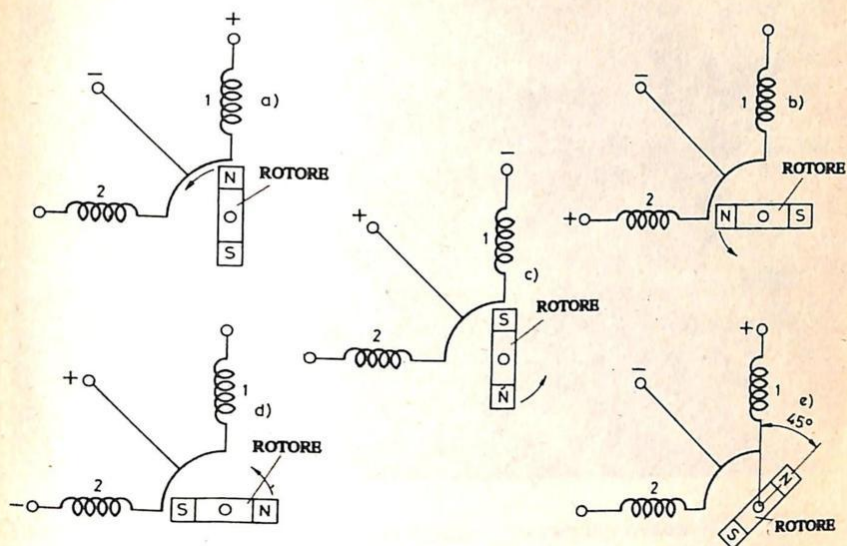



Fig. 12.- Sequenza di funzionamento di un motore a magnete permanente con due avvolgimenti: a) eccitazione dell'avvolgimento 1; b) eccitazione dell'avvolgimento 2; c) nuova eccitazione di 1, ma con polarità invertita; d) nuova eccitazione del 2, ma con polarità invertita; e) angolo formato dal rotore, quando si carica il motore con la coppia massima.

Il rotore è formato da un nucleo di ferro dolce di forma cilindrica, con però un certo numero di denti posizionati longitudinalmente lungo la superficie laterale.

Per analizzarne il funzionamento, si supponga che il motore sia costituito da tre avvolgimenti, B1, B2, e B3, eccitati sequenzialmente, e da un rotore con quattro denti, D1, D2, D3, e D4.

Quando il primo avvolgimento (B1) viene alimentato, attrae il rotore in modo che il dente più vicino si allinei con il campo, ad esempio D1; quando viene eccitato B2, il dente D2 sarà molto prossimo, per cui il rotore ruoterà di 30°, e così via per i successivi impulsi. L'eccitazione di B3 influirà sul dente D3, con un conseguente avanzamento di un successivo passo di 30°, e alla successiva rialimentazione di B1, verrà attratto D4, con un eguale avanzamento

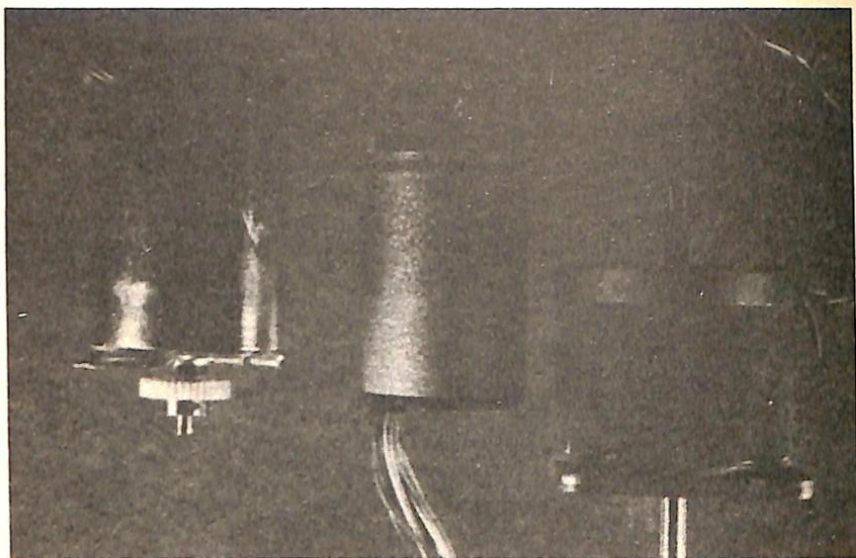



Fig. 13.- Altro modello di motore, costituito da vari insiemi rotore-statore allineati sullo stesso asse.

del rotore.

Come facilmente si può dedurre, a differenza dal caso precedente, la polarità, o verso di circolazione della corrente in ciascun avvolgimento, è indifferente, poiché il rotore tenderà a portarsi, quando non è magnetizzato, nella posizione di minima riluttanza. Per ottenere spostamenti angolari di 15°, sarà necessario aumentare il numero di denti del rotore, in modo che questo numero sia tanto maggiore quanto minore è il valore di avanzamento del passo.

Anche in questo tipo di motori sono valide le considerazioni fatte precedentemente per la coppia motrice di avviamento.

La caratteristica principale di questo tipo di motori passo-passo a riluttanza variabile, è l'elevata velocità di azionamento, che permette di raggiungere velocità di 1.200 passi al secondo.

Un'altra forma costruttiva per questo tipo di motori, è quella di effettuare un raggruppamento di vari insiemi rotore-statore, quest'ultimo alimentato sequenzialmente. I passi si ottengono grazie alla posizione degli avvolgimenti di ciascun statore, allineando i tre rotori, in modo da costituire un rotore unico.

Esiste infine, un certo tipo di motore passo-passo definito *motore ibrido*, che accorpora le caratteristiche di entrambi per ricavare una coppia di azionamento molto significativa, un elevato numero di passi, e una frequenza di lavoro sufficientemente elevata.

CAPITOLO 10

CONTROLLO DEI MOTORI IN CORRENTE CONTINUA

Considerando che la velocità di un motore in corrente continua è direttamente proporzionale al flusso, si cerca di controllare il suddetto parametro agendo su questo fattore, in funzione delle caratteristiche richieste in ciascun caso particolare.

La maggior parte dei controlli di velocità industriali, richiedono una coppia costante per le distinte velocità, il ché si ottiene controllando la tensione ai capi del motore, mantenendo costante l'eccitazione del campo induttore.

D'altra parte, alcune applicazioni richiedono la regolazione della velocità mantenendo costante la potenza.

In questo caso, la regolazione della velocità si ottiene variando l'eccitazione del campo con uno shunt.

La coppia motrice T è proporzionale al prodotto del flusso per la corrente di indotto e per un coefficiente caratteristico; pertanto, con la corrente nominale di indotto, la coppia diminuisce al diminuire del flusso, e si ottengono velocità gradatamente più elevate.

Poiché la potenza è direttamente proporzionale al prodotto della coppia per la velocità, si ottiene che:

$$P = KT\omega = K\Phi I\omega.$$

Per una corrente costante, la variazione del flusso è praticamente costante. Qualunque aumento della velocità, a causa della diminuzione del campo induttore, provoca una diminuzione proporzionale della coppia.

Gli elementi più utilizzati, per applicazioni di potenza, per il controllo della velocità nei motori, sono i *tiristori* (raddrizzatori controllati).

Per applicazioni di piccola potenza, e invece possibile, e molte volte più vantaggioso, usare dei transistor di potenza.

Raddrizzatore controllato (tiristore)

Un diodo conduce quando il suo anodo è più positivo del suo catodo. Nel caso dei tiristori, è necessario, per la conduzione, un impulso sul *gate*. Nella maggior parte delle applicazioni industriali, sono sufficienti due tiristori in combinazione con due diodi, per effettuare il controllo richiesto (vedere Fig. 1).

Come viene indicato in Fig. 2, può essere utilizzato anche un diodo rapido (free wheeling) D3, che conduce la corrente induttiva sulla parte finale della semionda, finché si riduce a zero, o finché un nuovo impulso non la trasferisce sull'altro tiristor.

In Fig. 3, sono riportate le distinte curve di tensione e di corrente esistenti sul motore.

Configurazione di base

In Fig. 4 è rappresentato un tipico variatore di velocità molto comune in commercio.

Le parti costituenti il variatore di detta figura sono le seguenti:

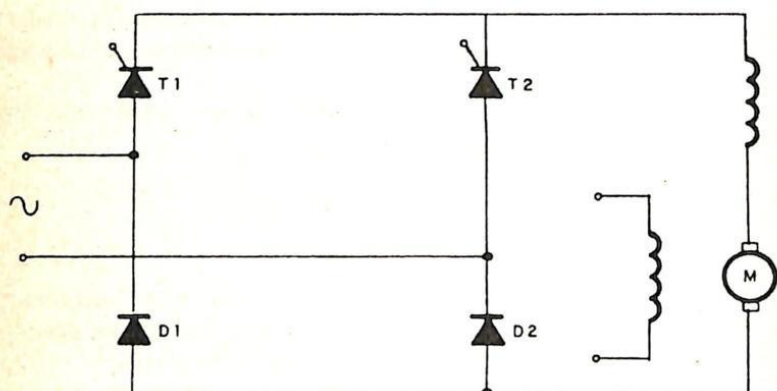



Fig. 1.- Controllo di un motore in c.c., mediante due tiristori e due diodi.

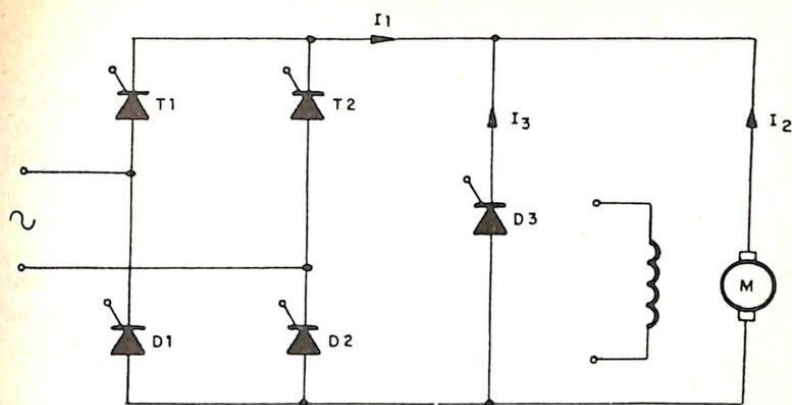



Fig. 2.- Inserimento del diodo rapido D3.

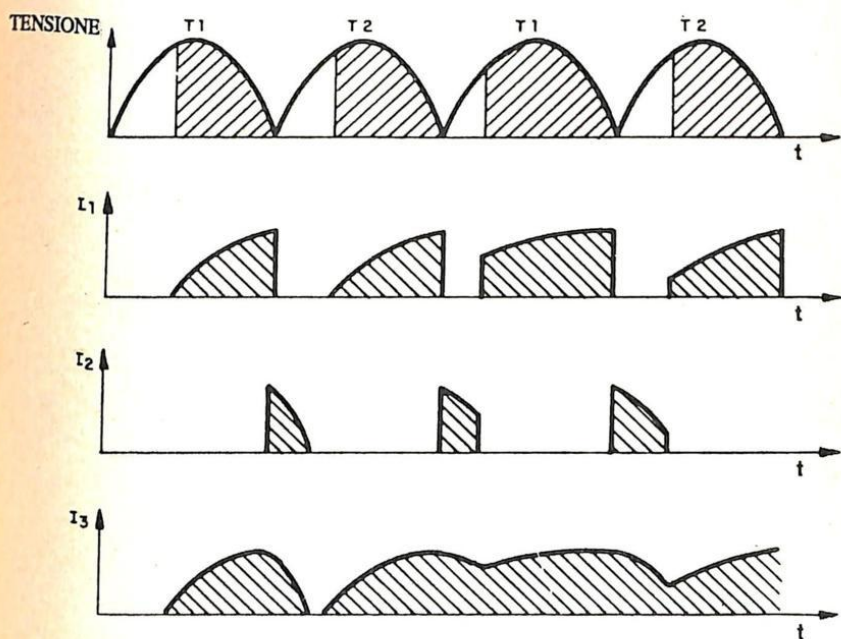



Fig. 3.- Forme d'onda sul motore.

Circuito di potenza

Costituito da due tiristori il cui innesco è controllato da un circuito apposito, in cui vengono utilizzati due diodi. Questo ponte, è incaricato di somministrare la potenza necessaria al motore perché giri alla velocità selezionata, tramite il selettore di velocità.

Circuito di reazione

La dinamo tachimetrica permette di reazionare un segnale che è funzione della velocità di reazione. Nel caso in cui la velocità selezionata e quella reale dell'asse non siano uguali, viene prodotto un segnale di errore che reagisce sul sistema per il raggiungimento della velocità selezionata.

Utilizzo dei transistori di potenza

Nel controllo della velocità dei motori in corrente continua, risulta vantaggioso l'utilizzo dei transistori di potenza per applicazioni di piccola potenza. Esistono normalmente due configurazioni di base.

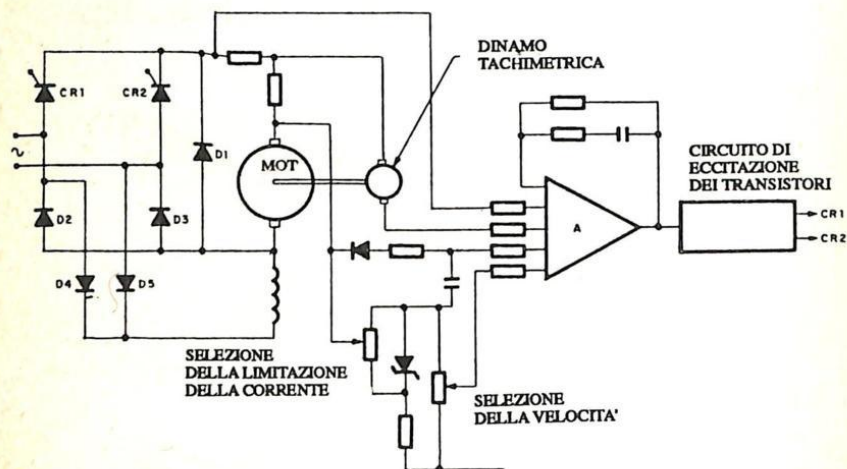



Fig. 4.- Variatore di velocità molto comune in commercio.

Configurazione di tipo H

Utilizza quattro transistori di potenza e una sola sorgente di alimentazione, come rappresentato in Fig. 5.

In questa configurazione, il funzionamento dei transistori è tale che rimangono sempre in conduzione o in interdizione in coppia.

In questo modo, se T1 e T4 conducono, T2 e T3 sono interdetti, e viceversa.

Regolando il tempo di conduzione o di interdizione, si varia la velocità del motore.

Configurazione di tipo T

E' rappresentata in Fig. 6. Utilizza due transistori di potenza e due sorgenti di alimentazione.

Metodi per il controllo della potenza

Con questi tipi di sistema, si possono utilizzare tre metodi per il controllo della potenza:

- *Modulazione di larghezza dell'impulso*, PWM. (PULSE WIDTH

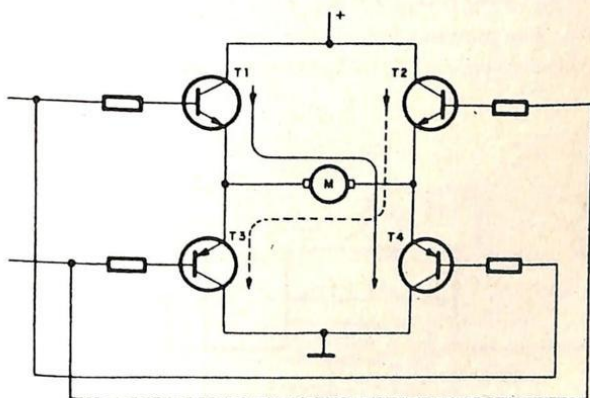



Fig. 5.- Configurazione ad H con quattro transistors.

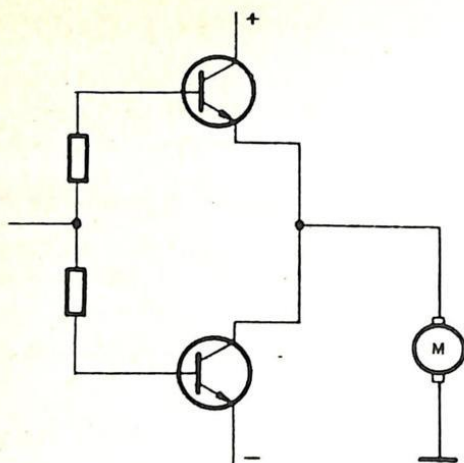



Fig. 6.- Configurazione a T con due transistors.

MODULATION);

- *Modulazione della frequenza dell'impulso*, PFM. (PULSE FREQUENCY MODULATION);
- *Raddrizzamento controllato con SCR al silicio.* (SILICON CONTROLLED RECTIFIER).

Di seguito viene presentata una breve descrizione di quest'ultimo, mentre di seguito verranno presentati, in forma sommaria, gli altri due.

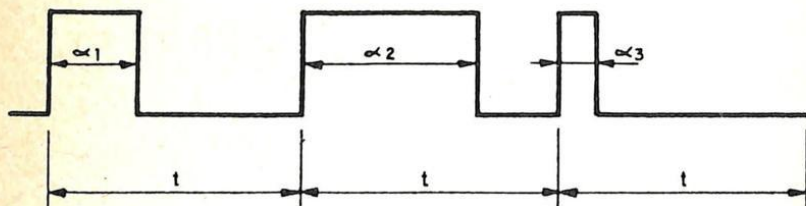



Fig. 7.- Variazione della larghezza dell'impulso.

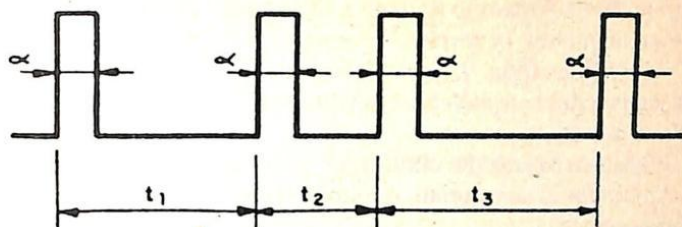



Fig. 8.- Variazione della frequenza, mantenendo costante la larghezza dell'impulso.

Sistema PWM

Questo sistema utilizza normalmente una sola sorgente di alimentazione. Per ottenere le variazioni di frequenza, l'amplificatore di commutazione viene scelto per una frequenza costante, e viene modificata solo la larghezza dell'impulso, come mostrato in Fig. 7.

L'amplificatore è connesso alla sorgente di alimentazione con una frequenza fissa, ma con un angolo variabile. In questo modo, si ottiene la tensione media più opportuna sul carico.

Sistema PFM

Sfrutta una larghezza dell'impulso costante, però varia la frequenza. I ri-

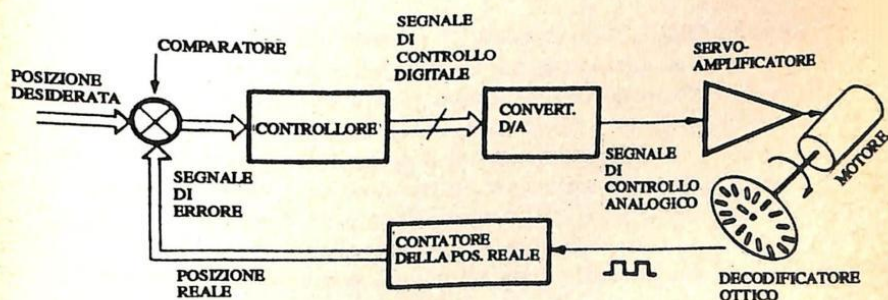



Fig. 9.- Schema a blocchi di un sistema di controllo generalizzato per motori in c.c.

sultati ottenuti utilizzando questo metodo, sono molto simili a quelli ottenuti con il metodo PWM (vedere Fig. 8).

In Fig. 9, è riportato lo schema a blocchi di un sistema generalizzato di controllo di un motore in corrente continua.

Il controllore di Fig. 9, riceve il segnale di errore dal comparatore, e genera un segnale di controllo che, convertito in analogico e amplificato, viene applicato al motore.

L'implementazione del controllore può essere fatta tramite l'hardware, con circuiti integrati appropriati, o tramite il software, utilizzando un sistema a microprocessore.

CAPITOLO

SISTEMI DI CONTROLLO PER MOTORI PAP

Una buona regolazione del movimento di un motore PAP, richiede un sistema di controllo appropriato.

In linea generale, il sistema di controllo riceve le indicazioni della velocità e del senso di rotazione, e genera i relativi impulsi elettrici adeguati per le bobine del motore, come mostrato, in forma schematica, in Fig. 1.

Anche se i motori PAP sono stati concepiti per funzionare con sistemi a circuito aperto, è possibile effettuarne il controllo con sistemi a circuito chiuso.

Sistemi di controllo a circuito aperto, basati su microprocessori

I segnali di controllo generati dal sistema, devono tener conto delle restrizioni imposte da motore, dal carico, e dal circuito di adattamento.

Nei sistemi a circuito aperto, non esiste reazione sulla posizione reale dell'albero del motore, per cui risulta indispensabile che i cambi di eccitazione che si applicano alle bobine siano estremamente precisi.

Se questi cambi sono molto rapidi, e l'inerzia dell'asse non riesce a seguirli, si generano degli errori di posizionamento. Inoltre, bisogna anche considerare le variazioni di carico applicate al motore.

Anche se i costruttori di circuiti integrati offrono dei componenti dedicati al controllo dei motori PAP, l'utilizzo dei sistemi a microprocessore offre i seguenti vantaggi:

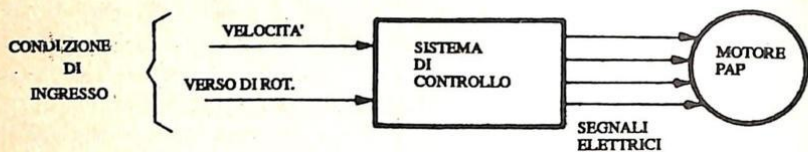



Fig. 1.- Schema generale di azionamento del sistema di controllo.

- *programma di controllo facilmente modificabile, essendo basato su di un software;*
- *possibilità del controllo di altre funzioni ausiliarie;*
- *possibilità di utilizzare parte della memoria per analizzare dati, o eseguire programmi di utility.*

Un sistema di controllo a microprocessori, può effettuare la generazione delle sequenza degli stati, come quella dei segnali di temporizzazione e dei caratteri ausiliari. Inoltre, può integrare le informazioni digitali di posizione, e i comandi di avviamento e arresto, delegandone l'elaborazione dei segnali di controllo di fase a componenti collegati esterni.

Se il sistema a microprocessore si occupa di tutto il controllo, si possono rappresentare configurazioni complesse che ottimizzano il funzionamento del motore. Per esempio, si potrebbe definire esattamente la durata di ogni passo, e regolare con precisione la velocità secondo una curva memorizzata.

Quando un sistema a microprocessore opera congiuntamente ad un controllo ausiliario, i programmi sono meno ambiziosi.

Per motori PAP che raggiungono i 2.000 passi/secondo, con il passo di 50 microsecondi, un controllo dedicato rimane limitato a 25 - 50 istruzioni (il tempo di esecuzione può variare da 1 a 6 microsecondi per ciascuna istruzione), per ciascun passo del motore, considerando solo le funzioni più semplici di controllo (durata del passo, numero di sequenze dei passi).

Le possibilità che offre un sistema basato su microprocessore, sia hardware che software, sono molto più numerose, e si possono riassumere nelle tre categorie citate di seguito.

- Se si desidera lavorare a velocità costante, si può realizzare il controllo, completamente via software, con le seguenti caratteristiche:

  a) la velocità dei passi si mantiene fissa,

b) viene garantita la generazione della sequenza delle fasi applicate alle bobine del motore,

c) viene registrato il conteggio dei passi per il raggiungimento del numero prefissato, in cui deve avvenire l'arresto.

Poiché è il software a sopportare queste tre funzioni, viene semplificata notevolmente l'interfaccia con il motore, che può essere anche ad adattamento diretto.

- Il software si incarica del conteggio degli impulsi della sequenza, dei segnali di avviamento e di arresto,e del senso di rotazione. La velocità, o durata dei passi, viene fissata mediante un clock esterno controllato dal microprocessore. Il clock, fornisce al microprocessore il numero degli impulsi che vengono applicati alle bobine. Questa informazione viene inviata al contatore che genera i segnali di controllo della sequenza che determina il commando del verso di rotazione, e che arriva al microprocessore (vedere Fig. 2).

Con questo sistema si semplifica notevolmente il software, e si utilizza un hardware molto semplice e poco costoso.

- Le funzioni di base del controllo vengono realizzate dall'hardware. Il software controlla solo il funzionamento generale, però non si occupa di ciascun passo del motore, potendosi dedicare ad altri compiti. L'hardware è molto potente, anche se incompleto, grazie all'utilizzazione dei circuiti integrati dedicati.

Il sistema a microprocessori proposto, esegue una routine di inizializza-

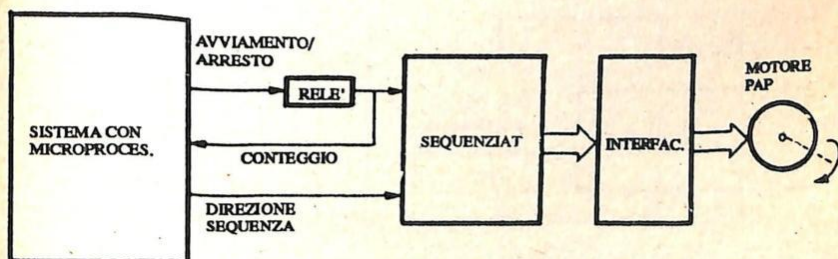



Fig. 2.- Combinazione hardware e software nel controllo di un motore PAP.

PB3 Q4	PB2 Q3	PB1 Q2	PB0 Q1	PASSI
0	0	1	1	PASSO 1
1	0	0	1	PASSO 2
1	1	0	0	PASSO 3
0	1	1	0	PASSO 4

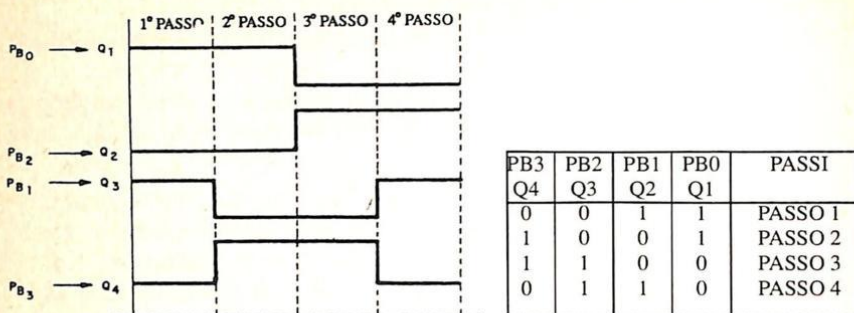



Fig. 3.- Diagramma degli stati logici con relativa tavola della verità, da applicare alle bobine di un motore PAP perché ruoti in senso orario.

zione che comprende le seguenti funzioni:

- attivazione di un decontatore, sulla posizione prefissata,
- avviamento di un clock a frequenza constante,
- generazione del segnale di verso al contatore di sequenza.

Il clock serve per il controllo della velocità della sequenza e, pertanto, a quella dei passi del motore.

Quando la velocità del motore è uguale a quella prefissata, il contatore

PB3 Q4	PB2 Q2	PB1 Q3	PB0 Q1	PASSI
0	0	1	1	PASSO 1
0	1	1	0	PASSO 2
1	1	1	0	PASSO 3
1	0	0	1	PASSO 4

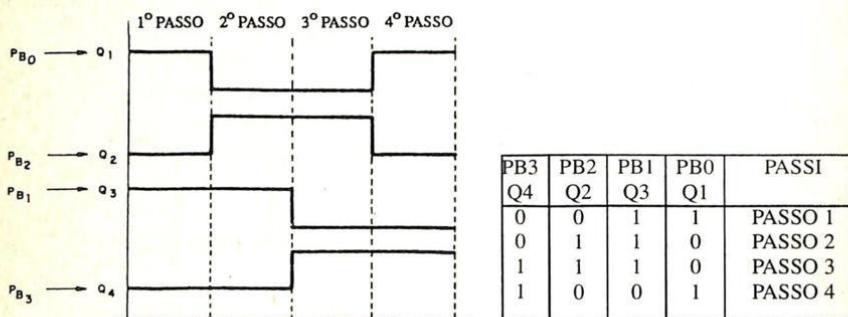



Fig. 4.- Diagramma degli stati logici con relativa tavola della verità, da applicare alle bobine di un motore PAP perché ruoti in senso antiorario.

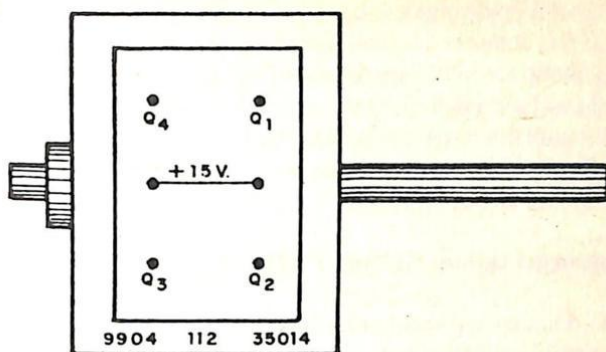



Fig. 5.- Diagramma delle connessioni del motore PAP 9904 112 35014 della Philips.

raggiunge lo zero, per cui il microprocessore blocca l'azione del clock.

Controllo di un motore PAP comune con l'ausilio di un microcomputer AIM - 65

In base alla teoria generale dei motori passo-passo, si tratta ora di effettuarne il controllo della velocità di rotazione, tramite un programma residente nella memoria del microcomputer AIM - 65, che è collegato con alcune sue linee di uscita alle bobine del motore.

Per una esemplificazione pratica, si è utilizzato un motore PAP della Philips, modello 9904 112 35014, utilizzato nel microrobot ARMDROID.

Il motore Philips 9904 112 35014 è di tipo unipolare, con quattro fasi. L'angolo del passo è di 7° e 30', e la sua coppia massima di lavoro è di 57 mNm. Il costruttore raccomanda il controllo di questo motore mediante il circuito integrato SAA 1027, che verrà descritto più avanti.

Il consumo è di 5,3 W e raggiunge una velocità massima di 130 passi/s. Tollera una temperatura di lavoro di 120 °C, e ciascuna rivoluzione è costituita da 48 passi.

Sequenza degli stati logici

Gli stati logici che devono essere applicati alle quattro bobine del moto-

re PAP da controllare, quando il suo asse gira in senso orario, sono rappresentati in Fig. 3, mentre in Fig. 4 riporta il ciclo degli stati logici con l'asse del motore che ruota in senso antiorario.

Il diagramma delle connessioni delle quattro bobine del motore 9904 112 35014 è molto semplice, ed è rappresentato in Fig. 5.

Come si può facilmente comprendere, la velocità di rotazione del motore PAP sarà proporzionale alla frequenza degli impulsi applicati alle bobine.

Controllando la durata di ciascun stato della sequenza, si può regolare la velocità del motore.

Interfaccia del motore PAP con l'AIM - 65

L'AIM - 65 mette a disposizione dell'utilizzatore le 16 linee di entrata e di uscita tramite il VIA 6522, divise in due porte A e B, di otto linee ciascuna.

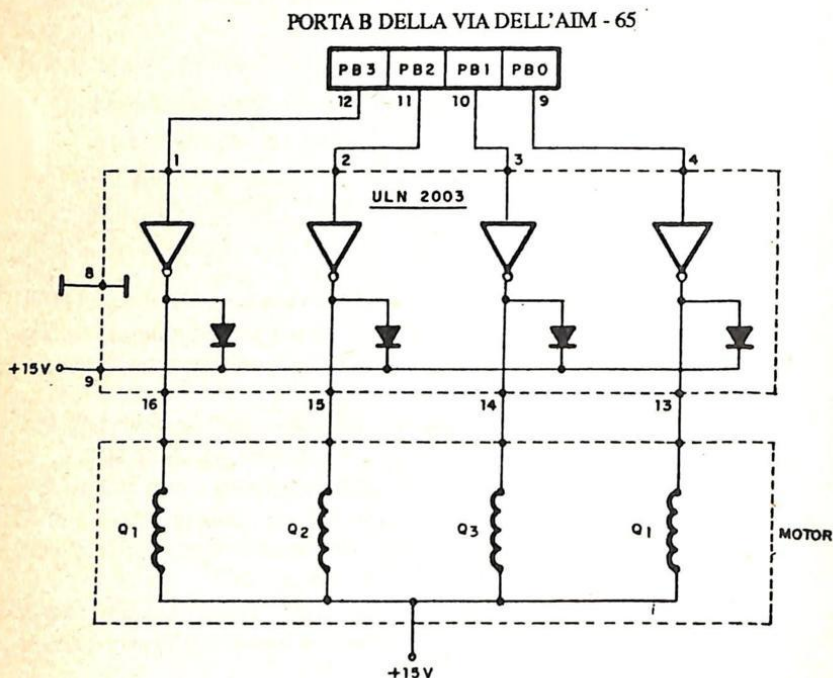



Fig. 6.- Diagramma delle connessioni delle quattro linee di uscita di VIA dell'AIM-65 (PB0-PB3) con le bobine del motore PAP, attraverso il circuito amplificatore ULN 2003.

```
0800  A9  LDA  #FF     inizio entrata/uscita. PB come
0802  8D  STA  A002    uscita
0805  A9  LDA  #03     uscita del codice 0011 per PB3-
0807  8D  STA  A000    PB0 e generazione di un ritardo o
080A  20  JSR  0828    temporizzazione. Primo passo
080D  A9  LDA  #06     uscita del codice 0110. Secondo
080F  8D  STA  A000    passo che genera un ritardo
0812  20  JSR  0828
0815  A9  LDA  #0C     uscita del codice 1100. Terzo pas-
0817  8D  STA  A000    so, ritardo
081A  20  JSR  0828
081D  A9  LDA  #09     uscita del codice 1001. Quarto
081F  8D  STA  A000    passo, ritardo
0822  20  JSR  0828
0825  4C  JMP  0805    ripete il ciclo precedente
0828  48  PHA
0829  A9  LDA  #00
082B  8D  STA  A00B
082E  A9  LDA  #40
0830  8D  STA  A004    con il timer 1 del Via dell'AIM -
0833  A9  LDA  #1F     65, si realizza un ritardo di 8
0835  8D  STA  A005    ms/passo
0838  AD  LDA  A00D
083B  29  AND  #40
083D  F0  BEQ  0838
083F  68  PLA
0840  60  RTS
```

Per fornire al motore PAP le sequenze degli stati logici, l'AIM - 65 sfrutta le quattro linee meno significative della porta B, denominate PB0, PB1, PB2, PB3.

Gli impulsi logici sono generati dalla CPU, per l'esecuzione del programma adeguato. Escono dalle 4 linee menzionate e, dopo essere stati amplificati tramite il buffer amplificatore ULN 2003, vengono applicati alle bobine del motore.

In Fig. 6, è rappresentato il diagramma delle connessioni delle 4 linee di uscita dell'AIM - 65 (PBO-PB3) alle bobine del motore, attraverso l'amplifi-

0800	A9	LDA	#FF	inizializza la porta B come uscita
0802	8D	STA	A002	
0805	38	SEC		
0806	A9	LDA	#33	uscita del codice 0011 per PB3-
0808	8D	STA	A000	PB0. Primo passo e generazione
080B	20	JSR	082C	di un ritardo
080E	6A	ROR	A	
080F	8D	STA	A000	uscita del codice 1001. Secondo
0812	20	JSR	082C	passo e ritardo
0815	6A	ROR	A	
0816	8D	STA	A000	uscita del codice 1100. Terzo pas-
0819	20	JSR	082C	so e ritardo
081C	18	CLC		
081D	6A	ROR	A	
081E	8D	STA	A000	uscita del codice 0110. Quarto
0821	20	JSR	082C	passo e ritardo
0824	6A	ROR	A	
0825	8D	STA	A000	uscita del codice 0011. Quinto
0828	38	SEC		passo e ritardo
0829	4C	JMP	080B	ripete il ciclo precedente
082C	48	PHA		
082D	A9	LDA	#00	
082F	8D	STA	A00B	
0832	A9	LDA	#40	
0834	8D	STA	A004	viene realizzato un ritardo di 8 ms
0837	A9	LDA	#1F	con il timer 1 del VIA dell'AIM -
0839	8D	STA	A005	65.
083C	AD	LDA	A00C	
083F	29	AND	#40	
0841	FO	BEQ	083C	
0843	68	PLA		
0844	60	RTS		

catore citato precedentemente.

Programma di controllo

Utilizzando il linguaggio macchina del microprocessore 6502, con i relativi codici mnemonici, viene descritto di seguito il programma necessario

per il controllo del motore PAP della Philips, in entrambi i sensi di rotazione.

Il software si occupa di generare la sequenza degli stati logici, e successivamente di mantenerla per un certo tempo, per controllare la velocità e il senso di rotazione. Nel programma, i passi hanno una durata prefissata di 8 millisecondi.

Controllo di un motore PAP comune, con un microcomputer SDK - 85

In questo esempio, a differenza del precedente, viene utilizzato un microcomputer basato sul micro 8085 della Intel, un circuito dedicato per il controllo dei motori PAP; si tratta dell'SAA 1027, il cui diagramma di connessioni è rappresentato in Fig. 7.

L'SAA 1027 utilizza tre segnali di entrata, per la generazione della sequenza di impulsi appropriata da applicare alle bobine del motore. Questi segnali sono:

- T = impulsi che produce il microcomputer ospite, che generano i passi del motore. Il periodo e il numero di detti impulsi, determinano la velocità e la posizione finale dell'asse del motore;
- R = lo stato logico di questo segnale generato dal microcomputer determina il verso di rotazione dell'asse. Quando R = 1 la rotazione è antioraria, e quando R = 0 l'asse del motore gira in verso orario.

I due segnali T e R escono da due linee di una porta del microcomputer SDK - 85, utilizzato in questo esperimento. Questi segnali vengono successivamente convertiti e amplificati dal buffer 7407, come rappresentato in Fig. 8.

- S = segnale che abilita la generazione della sequenza di movimento del motore (S = 1).

In Fig. 9 sono riportate le interazioni dei segnali S, R, e T.

Il motore da controllare è simile a quello dell'esempio precedente, un Philips 9904 112 32001, di 2 W di assorbimento, un angolo di passo di 7° 30', una tolleranza per passo di ± 40', e 48 passi per rivoluzione.

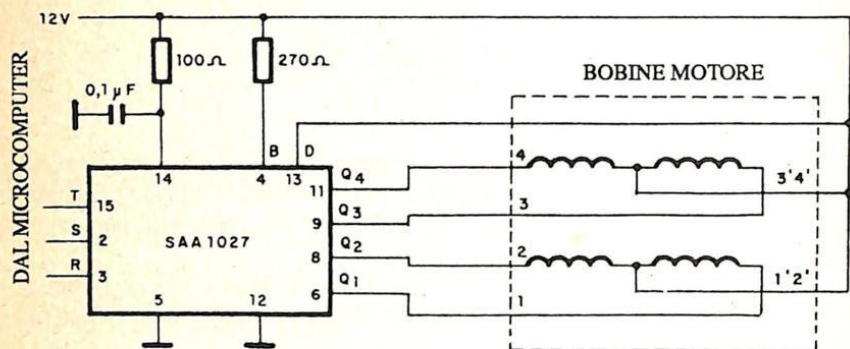



Fig. 7.- Connessioni del circuito integrato SAA 1027, dedicato per il controllo dei motori PAP.

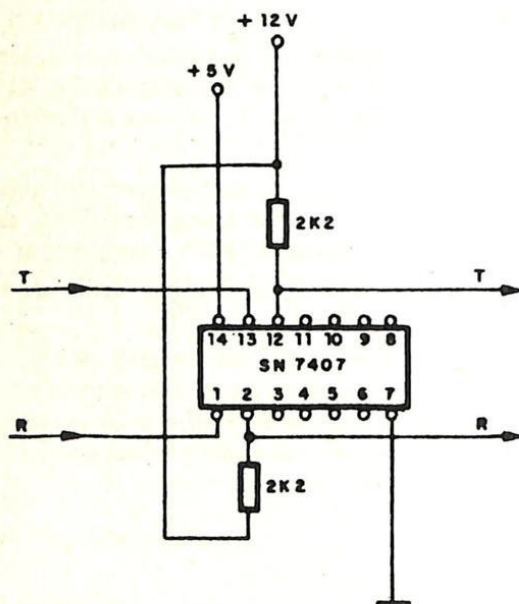



Fig. 8.- Amplificazione dei segnali T e R, tramite il buffer 7407.

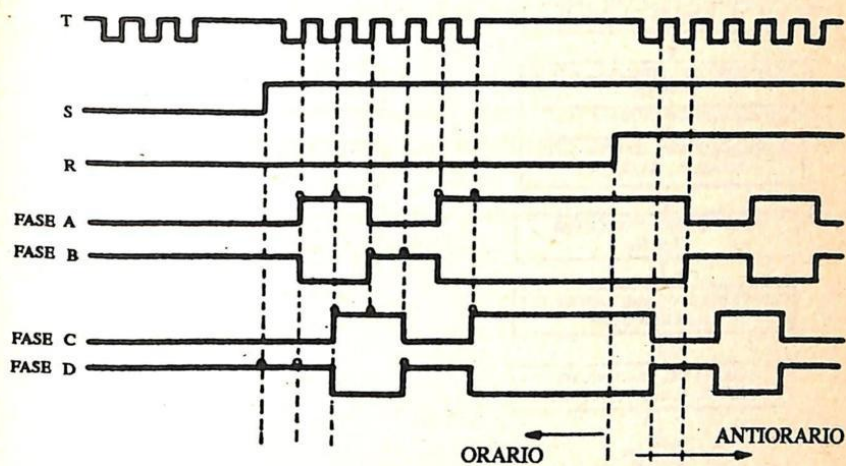



Fig. 9.- Interazione dei segnali S, R, e T, nel circuito SAA 1027.

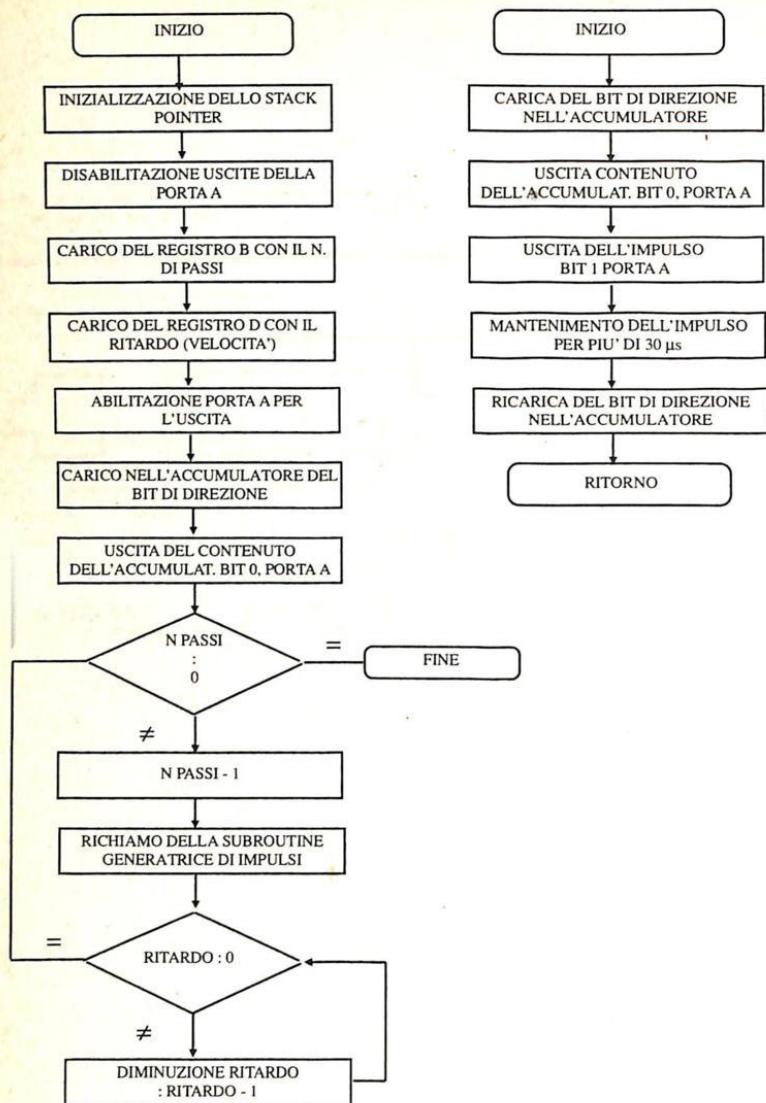



Fig. 10.- Diagramma di flusso corrispondente al programma di controllo del motore PAP, con il microcomputer SDK - 85.

Caratteristiche del programma di controllo

Nello sviluppo del programma che verrà eseguito dal microprocessore 8085, bisogna tener conto dei seguenti aspetti:

- gli impulsi T che escono dal bit o linea 1 della porta 0 del microcomputer SDK - 85, devono avere un periodo di circa 30 msec, che è il tempo necessario per lo svolgimento di un passo dell'SAA 1027;
- il programma deve controllare la velocità e la direzione di rotazione dell'asse del motore, che si può ottenere intercalando un ritardo tra gli impulsi. La velocità varia, cambiando il valore di questo ritardo.

In Fig. 10 è rappresentato il diagramma di flusso del programma che è stato sviluppato per questo esempio.

Se hai l'esigenza di conoscere per costruire tutto sull'elettronica, il Gruppo Editoriale Jackson ti propone i nuovi:

"Libri di Base Elettronica",

20 preziose guide attraverso circuiti, componenti, grafici, fotografie e soprattutto innumerevoli idee per scatenare la tua fantasia con progetti collaudati e di immediata realizzazione.

Il motore è un elemento indispensabile in un gran numero di apparecchiature elettroniche. La conoscenza del suo modo di operare e delle sue proprietà, è indispensabile per qualunque tecnico o appassionato che utilizzi questo componente, con lo scopo di poter scegliere il modello più idoneo e ottenere il miglior rendimento dallo stesso.
Lo scopo fondamentale di un motore elettrico, è quello di trasformare l'energia elettrica che gli viene fornita, in energia meccanica che verrà utilizzata per porre in movimento i meccanismi dell'apparecchiatura a cui è collegato.
I fenomeni ai quali si deve la trasformazione dell'energia sono quelli induttivi; è necessario perciò definire le leggi che regolano gli stessi, per stabilire le relazioni più convenienti tra gli organi meccanici e elettrici di un motore.
L'azione elettrodinamica delle correnti, è più semplice da comprendere dell'induzione, per cui si è preferito partire dai principi dell'elettrodinamica, per poi arrivare allo studio dell'induzione.